

# **Einfluss des Reparaturschweißens von Altstählen auf deren Restlebensdauer**

**Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und  
Stadtplanung der Brandenburgischen Technischen Universität  
Cottbus-Senftenberg zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation**

von

Diplom-Ingenieur (FH)

Diplom-Wirtschaftsingenieur (FH)

Stefan Doliva

aus Berlin

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Schuster
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Udo Peil

Tag der Disputation: 18. November 2016





Meinem Vater Gideon gewidmet



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in enger Zusammenarbeit mit der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV Halle GmbH und der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes der SLV Halle GmbH bot sich die Möglichkeit, den lange gehegten und ehrgeizigen Wunsch nach einer Promotion mit diesem interessanten Thema zu verbinden. Somit schließt sich ein Kreis zwischen täglicher Ingenieurarbeit und wissenschaftlicher Forschungsarbeit.

Besonderer Dank gilt den wissenschaftlichen Betreuern und Gutachtern, Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Pasternak, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, und Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Schuster, SLV Halle. Ohne ihr Vertrauen und die nachdrücklichen Fragestellungen beider wäre diese Arbeit nicht entstanden. Für die Übernahme der dritten Begutachtung ist Herrn em. Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Peil, vormals Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dank zu zollen. Für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses bin ich Herrn Professor Dr.-Ing. Hans-Christoph Thiel zu Dank verpflichtet.

Die Prüfinfrastruktur wurde von der SLV Halle GmbH zur Verfügung gestellt. Dafür geht Dank nach Halle, ganz besonders an Herrn Dipl.-Ing. Wagner, den Leiter der Abteilung Werkstoffprüfung der SLV Halle.

Nicht unerwähnt dürfen meine Eltern Margot und Gideon bleiben. Durch sie bin ich, was ich bin. Ich hätte meinem Vater gerne noch diese Arbeit vorgelegt, leider reichte seine Zeit nicht mehr aus.

Jedoch wäre diese Arbeit ohne meine Frau Nicole keinen Schritt vorangekommen. Sie war für das redaktionelle Herrichten der Arbeit, für das Lektorat und als kritische Leserin und Zuhörerinnen unerlässlich. An dieser Stelle gilt Kleist: Die Gedanken verfertigen sich allmählich beim Reden. Sie hörte zu. Für ein Masterstudium des Bauwesens reicht ihr Wissen allemal, zumal sie schon zu 50 % Schweißfachingenieurin ist. Wenn sie promoviert, stehe ich zur Verfügung.

Am 19.09.2013 wurde unsere Tochter Malena geboren, sie hielt von der Arbeit ab und trieb gleichermaßen zur Arbeit an.

Berlin, November 2016

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>1 Kurzfassung</b>	<b>1</b>
1.1 Kurzfassung – deutsche Version . . . . .	1
1.2 Abstract – English version . . . . .	2
<b>2 Einleitung</b>	<b>3</b>
2.1 Veranlassung . . . . .	3
2.2 Zielsetzung . . . . .	5
2.3 Einfluss der DIN EN 1993 (Eurocode 3) . . . . .	10
2.3.1 Schadenstoleranzkonzept . . . . .	12
2.3.2 Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung . . . . .	12
2.3.3 Nachweis bei periodischer Beanspruchung . . . . .	13
2.3.4 Nachweis bei nicht periodischer Beanspruchung . . . . .	13
2.3.5 Zählverfahren . . . . .	14
2.3.6 Schlussfolgerung . . . . .	15
2.4 Stand der Forschung . . . . .	15
<b>3 Die Stähle, ihre Herstellung und ihre Eignung zum Schweißen</b>	<b>21</b>
3.1 Der Begriff der Schweißbarkeit . . . . .	21
3.2 Puddeleisen . . . . .	24
3.2.1 Herstellung . . . . .	24
3.2.2 Metallurgie . . . . .	29
3.2.3 Schweißeignung . . . . .	29
3.3 Tiegelstahl . . . . .	30
3.3.1 Herstellung . . . . .	30
3.4 Bessemerstahl . . . . .	33
3.4.1 Herstellung . . . . .	33
3.4.2 Metallurgie . . . . .	37
3.4.3 Schweißeignung . . . . .	38
3.5 Siemens-Martin-Stahl . . . . .	40
3.5.1 Herstellung . . . . .	40
3.5.2 Metallurgie . . . . .	41
3.5.3 Schweißeignung . . . . .	42

3.6	Thomasstahl . . . . .	42
3.6.1	Herstellung . . . . .	42
3.6.2	Metallurgie . . . . .	44
3.6.3	Schweißeignung . . . . .	46
3.7	Elektrostahl . . . . .	46
3.7.1	Herstellung . . . . .	46
3.7.2	Metallurgie . . . . .	48
3.7.3	Schweißeignung . . . . .	48
3.8	Siliziumstahl . . . . .	49
3.8.1	Herstellung . . . . .	49
3.8.2	Metallurgie . . . . .	49
3.8.3	Schweißeignung . . . . .	50
3.9	Linz-Donawitz-Stahl . . . . .	50
3.9.1	Herstellung . . . . .	50
3.9.2	Metallurgie . . . . .	52
3.9.3	Schweißeignung . . . . .	52
3.10	Vergießungsverfahren des Stahles . . . . .	52
3.10.1	Unberuhigt vergossener Stahl . . . . .	56
3.10.2	Beruhigt vergossener Stahl . . . . .	57
3.10.3	Besonders beruhigt vergossener Stahl . . . . .	59
3.11	Erläuterung der Terminologie Eisen und Stahl . . . . .	59
3.11.1	Frühere Normstände . . . . .	59
3.11.2	Heutiger Stand der Normung . . . . .	60
3.12	Übersicht über die Herstellungszeiträume . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Identifizierung der Altstähle</b>	<b>67</b>
4.1	Identifizierung anhand der Bauzeit . . . . .	67
4.2	Identifizierung anhand von Bestandsunterlagen . . . . .	67
4.3	Identifizierung anhand einer Schweißeignungsprüfung . . . . .	67
4.3.1	Feststellen der Walzrichtung . . . . .	68
4.3.2	Spektrometrie . . . . .	68
4.3.3	Zugversuch . . . . .	71
4.3.4	Kerbschlagbiegeversuch . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Ermüdungsfestigkeit</b>	<b>79</b>
5.1	Grundlagen . . . . .	79
5.2	Begrifflichkeiten . . . . .	81
5.3	Versuche . . . . .	90
5.3.1	Versuchsauswertung . . . . .	90

5.3.2	Verwendetes Probenmaterial . . . . .	99
5.3.3	Schweißungen . . . . .	100
5.3.4	Untersuchung des Grundmaterials . . . . .	100
5.3.5	Untersuchung der Wärmeeinflusszone . . . . .	103
5.3.6	Untersuchung der Vollnaht FAT 112 . . . . .	106
5.3.7	Untersuchung der Vollnaht FAT 90 . . . . .	110
5.3.8	Untersuchung der Vollnaht FAT 71 . . . . .	111
5.3.9	Untersuchung des T-Stoßes FAT 36 . . . . .	113
5.3.10	Grundsätzliche Erkenntnisse . . . . .	117
5.3.11	Grundsätzliche Einwände . . . . .	119
<b>6</b>	<b>Ermittlung der Restlebensdauer nach RIL 805</b>	<b>121</b>
6.1	Prinzipielles Vorgehen nach RIL 805 . . . . .	121
6.2	Restlebensdauer reparaturgeschweißter Bauwerke nach RIL 805 . . .	121
6.2.1	Einflussgröße Temperatureintrag durch das Schweißen . . . . .	122
6.2.2	Einflussgröße Kerbschlagarbeit . . . . .	122
6.2.3	Einflussgröße Kerbe . . . . .	124
6.2.4	Einflussgröße Rostnarben . . . . .	127
6.2.5	Einflussgröße Schweißnahtnachbehandlung . . . . .	127
6.3	Ausblick . . . . .	128
	<b>Literatur</b>	<b>131</b>
<b>A</b>	<b>Anlagen</b>	<b>143</b>
A.1	Probe G01-01 . . . . .	143
A.2	Probe G01-02 . . . . .	148
A.3	Probe G02-01 . . . . .	153
A.4	Probe G02-02 . . . . .	158
A.5	Probe G02-03 . . . . .	163
A.6	Probe G03-01 . . . . .	168
A.7	Probe G03-02 . . . . .	173
A.8	Probe G03-03 . . . . .	178
A.9	Probe G03-04 . . . . .	183
A.10	Probe G03-05 . . . . .	188
A.11	Probe G03-06 . . . . .	193
A.12	Probe G04-01 . . . . .	198
A.13	Probe G04-02 . . . . .	203
A.14	Probe G04-03 . . . . .	208
A.15	Probe G04-04 . . . . .	213
A.16	Probe G04-05 . . . . .	218

A.17	Zusammenfassung Proben FAT 160 . . . . .	223
A.18	Zusammenfassung Proben FAT 160 mit WEZ . . . . .	227
A.19	Zusammenfassung Proben FAT 112 . . . . .	231
A.20	Zusammenfassung Proben FAT 90 . . . . .	235
A.21	Zusammenfassung Proben FAT 71 . . . . .	239
A.22	Zusammenfassung Proben FAT 36 . . . . .	243
A.23	Gedächtnisprotokoll Nr. 1 zum Telefonat mit Prof. Kühn . . . . .	247
A.24	Gedächtnisprotokoll Nr. 2 zum Telefonat mit Prof. Kühn . . . . .	249
A.25	Prüfmaschinen . . . . .	251
A.26	Probenentnahme Grundwerkstoff G01 . . . . .	255
A.27	Probenentnahme Grundwerkstoff G02 . . . . .	259
A.28	Probenentnahme Grundwerkstoff G03 . . . . .	262
A.29	Probenentnahme Grundwerkstoff G04 . . . . .	265
A.30	Bilder und Schliffe . . . . .	268



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Stützenfuß einer Hallenstütze in Hamburg-Eidelstedt (Ringlokschuppen) mit massivem Lochfraß (Aufnahme des Verfassers) . . . . .	6
2.2	Kraftwirkungslinien in einem durch Nietdruck hoch beanspruchten Kesselblech; daher auch stärkere Ausbildung an der Nietkopfbegrenzung . . . . .	7
2.3	Rechnerische Simulation der Verformungsfigur nach Abkühlung einer Heißniete . . . . .	8
2.4	Zeitlicher Verlauf des Sicherheitsindex $\beta$ in Abhängigkeit von der Wahl des Bemessungskonzeptes und der Schadensfolge (Abbildung entnommen aus [19]) . . . . .	13
2.5	Reservoirmethode (Abbildung entnommen aus [21, S. 196]) . . . . .	14
2.6	Schweißarbeiten am „Eisernen Steg“ nach [25], Arbeitsprobe unter Baustellenbedingungen . . . . .	17
2.7	Schweißarbeiten am „Eisernen Steg“ nach [25], Schliffbild einer Vollnaht aus einer Arbeitsprobe, rechts Altstahl, lamellenartig . . . . .	18
2.8	Schweißarbeiten am „Eisernen Steg“ nach [25], Schliffbild einer Vollnaht aus einer Arbeitsprobe, rechts Altstahl, lamellenartig, Ausschnitt vergrößert und bearbeitet . . . . .	19
3.1	Das Dreieck der Schweißbarkeit nach DIN 8528-1 [29] . . . . .	21
3.2	Puddelofen: Das Eisen wurde im Herd „f“ aufgeschmolzen, auf dem Rost „b“ wurde befeuert, die Feuerbrücke „e“ verhinderte den direkten Kontakt zwischen Koks und Eisen (entnommen aus [40]) . . . . .	26
3.3	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (entnommen aus [41]) . . . . .	27
3.4	Puddler bei der Arbeit (entnommen aus [42]) . . . . .	28
3.5	Ein Luppenquetscher, ein mechanischer Schmiedehammer zum Zusammenquetschen respektive Zusammenschweißen der Luppe „g“ [40] . . . . .	28
3.6	Aufreißen des Probestückes unmittelbar nach der Schweißung direkt neben der Schweißnaht [44], Blick von der Seite . . . . .	30
3.7	Aufreißen des Probestückes unmittelbar nach der Schweißung direkt neben der Schweißnaht [44], Blick von oben . . . . .	31

3.8	Tiegelofen: Tiegel (A) im mit Brennstoff gefüllten Ofenschacht, abgedeckt durch Deckel (K); durch die Roste (B) gelangt Frischluft aus dem Wartungsgang (D) durch den Aschefall (C) in den Ofen, dann durch Fuchs (E) und Esse (F) ins Freie (Abbildung aus [45]) . . . . .	32
3.9	Eine Bessemerbirne (Konverter) (Abbildung entnommen aus [49]) . .	35
3.10	Durch Sprödbbruch zerstörte Strebe aus einer Altstahlkonstruktion, Blick von der Seite [54] . . . . .	37
3.11	Durch Sprödbbruch zerstörte Strebe aus einer Altstahlkonstruktion, Ansicht auf die Bruchfläche [54] . . . . .	38
3.12	Siemens-Martin-Ofen im Schnitt nach LEDEBUR [56, S. 259] . . . . .	40
3.13	Thomaskonverter, Ansicht und Schnitt, zeitgenössische Darstellung nach [57] . . . . .	43
3.14	Schematische Darstellung eines Lichtbogenofens [64] . . . . .	47
3.15	Lichtbogenofen mit noch glühenden Kohleelektroden im Stahlwerk Gröditz [66] . . . . .	48
3.16	Siliziumstahl (St Si) nach [44], oben Baumann-Abdruck, darunter Längsschliff mit ausgeprägter Schlackenzeiligkeit sowie mit chemischer Analyse . . . . .	51
3.17	Kokille auf einem Schrottplatz der Henrichshütte in Hattingen [69]; zum Größenvergleich möge die Spurweite der Schienen von 1.435 mm dienen . . . . .	54
3.18	Konzentration verschiedener Begleitelemente über die Blockhöhe nach VDE (entnommen aus [1, S. 19]) . . . . .	55
3.19	Makroschliff (Querschnitt) durch einen Rundstahl mit Speckschicht (hell), Seigerungen (dunkel), Einschlüssen (schwarz) und Fry'schen Kraftwirkungslinien (grau) (nach [54, S. 8]) . . . . .	57
3.20	Prinzipielles Verhalten von unberuhigt und beruhigt vergossenem Stahl [71] . . . . .	58
3.21	Übersicht über die Herstellungszeiträume, aufgeteilt nach Verfahren (gilt nur im deutschsprachigen Raum) . . . . .	63
3.22	Rohstahlerzeugung in Deutschland nach Verfahren [76] . . . . .	64
4.1	Mikroschliff der Probe G01 in ungeätzttem Zustand (links) und in geätzttem Zustand (rechts) mit eindeutiger Zeiligkeit [78, S. 24] . . . .	68
4.2	Dreifach abgefunkte Probe für die chemische Analyse der Probe G01 [78, S. 37] . . . . .	69
4.3	Chemische Zusammensetzung untersuchten Altstahles (Angaben in Massen-%), Probe G01, Auszug aus Anlage A.1 . . . . .	69

---

4.4	Klassifizierungshilfe für Stahlerzeugnisse nach LANGENBERG [58, S. 159] . . . . .	70
4.5	Makroaufnahme der Probe G01; es sind keine Speckschichten bzw. Seigerungen nachweisbar, ausgeprägte Fry'sche Kraftwirkungslinien, Ätzung nach Adler . . . . .	71
4.6	Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit charakteristischen Größen beim Zugversuch für die Bewertung der Schweißseignung [81] . . . . .	72
4.7	Mechanische Kennwerte des untersuchten Altstahls, Probe G01, Vergleich mit einem S355 nach [63], Auszug aus Anlage A.1 . . . . .	74
4.8	Anordnung und Durchführung des Kerbschlagbiegeversuchs nach [85, S. 281] . . . . .	75
4.9	Darstellung der Kerbschlagarbeit über der Temperatur der Probe, schematisch nach [85, S. 284] . . . . .	76
4.10	Darstellung der Kerbschlagzähigkeit von ungealterten und künstlich gealterten Proben unterschiedlicher Stähle nach ROIK [86, S. 50] . . .	77
4.11	Zähigkeitswerte des untersuchten Altstahls, Kerbschlagbiegeversuch Probe G01, Auszug aus Anlage A.1 . . . . .	77
4.12	Zähigkeitswerte des untersuchten Altstahls, Kerbschlagbiegeversuch Probe G03, Auszug aus Anlage A.7 . . . . .	78
4.13	Detaillierte Werte der geglühten Proben, Kerbschlagbiegeversuch Probe G03, Auszug aus Anlage A.6 . . . . .	78
5.1	Schematische Darstellung einer Bauteil-Wöhlerlinie nach [87, S. 10], hier mit der Schwingbreite $\Delta L_P = \Delta \sigma$ . . . . .	79
5.2	Ermüdungsbruchfläche eines schwingend belasteten Gewindebolzens, Probenmaterial der SLV Halle . . . . .	81
5.3	Ermüdungsbruchfläche eines Rundstahls nach [86, S. 59] . . . . .	82
5.4	Beanspruchungsgrößen für periodische Beanspruchungen nach WAGENKNECHT [91, S. 302] . . . . .	82
5.5	Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Spannungsverhältnis nach [92, S. 17] . . . . .	84
5.6	Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith (Schleifendiagramm) bei Zug-Druck-Dauerbeanspruchung, entnommen aus [99, S. 29] . . . . .	85
5.7	Vergleich der Spannungsschwingbreiten nach DS 804 und EC 3, entnommen aus [19, S. 448] . . . . .	86
5.8	Normierte Wöhlerlinie für Normalspannungen nach NUSSBAUMER [19, S. 420] . . . . .	87
5.9	Ergebnis der Schwingversuche, Probe G01-01, Wöhlerlinienneigung berechnet wie beschrieben, Auszug aus Anlage A.1 . . . . .	93

---

5.10	Schwingversuch der Proben G01-04, G03-04 und G04-04, Wöhlerlinienneigung $m = 6,00$ , Abknickpunkt bei $2,5 \cdot 10^6$ Lastwechseln, errechnete Streuung $T_{90:10} = 1,45$ , Schwingbreite 130 N/mm <sup>2</sup> . . . . .	95
5.11	Schwingversuch Probe G01-01, Wöhlerlinienneigung $m = 7,31$ , Abknickpunkt bei $2,5 \cdot 10^6$ Lastwechseln, errechnete Streuung $T_{90:10} = 1,22$ , Schwingbreite 193 N/mm <sup>2</sup> , Auszug aus Anlage A.1 . . . . .	96
5.12	Schwingversuch Probe G01-01, Smith-Diagramm, Schwingbreite 193 N/mm <sup>2</sup> , Auszug aus Anlage A.1 . . . . .	97
5.13	Ergebnis der Schwingversuche, Probe G01-01, Schwingbreiten im Vergleich, Auszug aus Anlage A.1 . . . . .	98
5.14	Ermüdungsriß einer Grundwerkstoffprobe G01-01, links die Übersicht, rechts der Riß im Detail, oben Beginn des Risses an einer Rostnarbe . . . . .	100
5.15	Vergleich der Proben G01 bis G04 – Grundmaterial FAT 160 – als separate Versuche . . . . .	101
5.16	Vergleich der Proben G01 bis G04 – Grundmaterial FAT 160 – als Grundgesamtheit aus 35 Proben . . . . .	102
5.17	Vergleich der Proben G02 bis G04 – Grundmaterial FAT 160 mit Wärmeeinfluss – als separate Versuche . . . . .	104
5.18	Vergleich der Proben G02 bis G04 – Grundmaterial FAT 160 mit und ohne Wärmeeinfluss – als separate Versuche . . . . .	105
5.19	Vergleich der Proben G02 bis G04 – Grundmaterial FAT 160 mit WEZ – als Grundgesamtheit aus 19 Proben . . . . .	107
5.20	Vergleich der Proben G03 und G04 – Vollnaht FAT 112 – als separate Versuche . . . . .	108
5.21	Vergleich der Proben G03 bis G04 – Vollnaht FAT 112 – als Grundgesamtheit aus 16 Proben . . . . .	109
5.22	Vergleich der Proben G01, G03 und G04 – Vollnaht FAT 90 – als separate Versuche . . . . .	111
5.23	Vergleich der Proben G01, G03 und G04 – Vollnaht FAT 90 – als Grundgesamtheit aus 24 Proben . . . . .	112
5.24	Vergleich der Proben G03 und G04 – Vollnaht FAT 71 – als separate Versuche . . . . .	113
5.25	Vergleich der Proben G03 und G04 – Vollnaht FAT 71 – als Grundgesamtheit aus 16 Proben . . . . .	114
5.26	Vergleich der Proben G03 – Kehlnaht Kreuzstoß FAT 36 – als separate Versuche . . . . .	115
5.27	Ermüdungsfestigkeitskurve für Längsspannungsschwingbreiten, aus [13, S. 18] . . . . .	116

5.28	Alternative Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ für Kerbfälle, die mit $\Delta\sigma_C^*$ bezeichnet sind, aus [13, S. 20] . . . . .	117
5.29	Vergleich der Proben G03 - Kehlnaht Kreuzstoss FAT 36 als Grundgesamtheit aus 8 Proben . . . . .	118
6.1	Einsatz einer Glühmanschette im Biomassenheizkraftwerk Steyr; Abstützungen sind wegen des Festigkeitsverlustes erforderlich [118] . .	123
6.2	Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche Probe G03 [119] . . . . .	124
6.3	Bild von Probe G03-03 mit Beginn des Risses an einem inneren Fehler (Schlackeeinschluss); siehe auch Anlage A.8, S. 178 ff. . . . .	125
6.4	Bild von Probe G04-05 mit Beginn des Risses am Nahtübergang (Nahtanstiegswinkel); siehe auch Anlage A.16, S. 218 ff. . . . .	126
6.5	Rissausgang an einer Korrosionsnarbe im Grundwerkstoff (Draufsicht), Probe G04-01; siehe Anlage A.12, . 198 ff.; Abbildung entnommen aus [119] . . . . .	126
6.6	Nachbehandlungsverfahren für Schweißnähte nach GERSTER [122] .	128
A.1	Probe G01-01, Grundwerkstoff FAT 160, Kraftwirkungslinien nach Fry, keine Speckschicht [78] . . . . .	269
A.2	Probe G01-02, Schweißnaht FAT 90, Riss in der Schweißnaht, Übersicht [78] . . . . .	269
A.3	Probe G01-02, Schweißnaht FAT 90, Riss in der Schweißnaht, Detail Rissbeginn und Kerbe [78] . . . . .	269
A.4	Probe G01-02, Schweißnaht FAT 90, Mikrogefüge Altstahl, ausgeprägte Ferritzeilen und nichtmetallische Einschlüsse [78] . . . . .	269
A.5	Probe G02-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Übersicht . . . . .	270
A.6	Probe G02-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, oberer Teil . . . . .	270
A.7	Probe G02-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Vergrößerung der WEZ . . . . .	270
A.8	Probe G02-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Gefüge der WEZ feinkörnig . . . . .	270
A.9	Probe G03-01, Grundwerkstoff FAT 160, keine Speckschicht . . . . .	271
A.10	Probe G03-01, Grundwerkstoff FAT 160, keine Speckschicht, Vergrößerung . . . . .	271
A.11	Probe G03-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe . . . . .	271
A.12	Probe G03-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Gefüge im Schweißgut . . . . .	271

A.13	Probe G03-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Gefüge in der WEZ . . . . .	272
A.14	Probe G03-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Gefüge im Grundwerkstoff . . . . .	272
A.15	Probe G03-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Schliff über die Höhe . . . . .	273
A.16	Probe G03-03, Schweißnaht FAT 112, Riss in der Schweißnaht, Beginn an einem Schlackeeinschluss . . . . .	274
A.17	Probe G03-03, Schweißnaht FAT 112, Riss in der Schweißnaht, Vergrößerung . . . . .	274
A.18	Probe G03-04, Schweißnaht FAT 90, Riss an der Schweißnaht, Nahtanstiegswinkel zu groß . . . . .	274
A.19	Probe G03-05, Schweißnaht FAT 71, einseitig geschweißt, Durchläufer	274
A.20	Probe G03-06, Schweißnaht FAT 36, Kreuzstoß mit Riss am Nahtansatz, niedriges Lastniveau . . . . .	275
A.21	Probe G03-06, Schweißnaht FAT 36, Kreuzstoß mit Riss an der Nahtwurzel, hohes Lastniveau . . . . .	275
A.22	Probe G03-06, Schweißnaht FAT 36, Kreuzstoß mit Riss an der Nahtwurzel . . . . .	275
A.23	Probe G03-06, Schweißnaht FAT 36, Kreuzstoß mit Riss an der Nahtwurzel, Nahtdicke rund 7 mm . . . . .	275
A.24	Probe G04-01, Grundwerkstoff FAT 160, keine Speckschicht . . . . .	276
A.25	Probe G04-01, Grundwerkstoff FAT 160 mit nichtmetallischen Einschlüssen . . . . .	276
A.26	Probe G04-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe . . . . .	276
A.27	Probe G04-03, Schweißnaht FAT 112, Durchläufer . . . . .	276
A.28	Probe G04-03, Schweißnaht FAT 112, Riss in der Schweißnaht . . . . .	277
A.29	Probe G04-03, Schweißnaht FAT 112, Riss in der Schweißnaht, Vergrößerung des Risses . . . . .	277
A.30	Probe G04-04, Schweißnaht FAT 90, Riss neben der Schweißnaht . . . . .	277
A.31	Probe G04-04, Schweißnaht FAT 90, Riss neben der Schweißnaht, Nahtansatzwinkel . . . . .	277
A.32	Probe G04-04, Schweißnaht FAT 90, Dauerschwingprobe . . . . .	278
A.33	Probe G04-03, Schweißnaht FAT 90, Durchläufer . . . . .	278
A.34	Probe G04-05, Schweißnaht FAT 71, Durchläufer . . . . .	278
A.35	Probe G04-05, Schweißnaht FAT 71, Vergrößerung . . . . .	278
A.36	Probe G04-05, Schweißnaht FAT 71, Riss an der Wurzel . . . . .	279

A.37 Probe G04-05, Schweißnaht FAT 71, Riss an der Wurzel, Vergrößerung des Risses . . . . .	279
---	-----





## Tabellenverzeichnis

3.1	DIN 17100 – Schweißbeignung: zulässige Konzentration in Masse-% ausgewählter Begleitelemente nach der Stückanalyse [31] . . . . .	23
3.2	Übersicht über die chemische Zusammensetzung von Altstahl nach der Stückanalyse nach [37] . . . . .	23
3.3	Übersicht über die chemische Zusammensetzung von Altstahl nach der Stückanalyse nach [36] . . . . .	24
3.4	Übersicht über die chemische Zusammensetzung von Altstahl nach der Stückanalyse nach [38] . . . . .	24
3.5	Einflussgrößen der Schweißbeignung von Bessemerstählen nach KU- SCHER [44] . . . . .	39
3.6	Anhaltswerte für Gehalte an Phosphor und Schwefel in unberührt vergossenen Profilen nach [70, S. 14] (Angaben in Massen-%) . . . . .	56
4.1	Bezeichnung der charakteristischen Größen des Spannungs- Dehnungs-Diagrammes . . . . .	73
4.2	Streckgrenze $f_{yk}$ und Zugfestigkeit $f_{uk}$ nach DIN EN 1993-1-1 [63, S. 28] – Auszug aus Tabelle 3.1 der Norm . . . . .	73
5.1	Übersicht über die Spannungsverhältnisse $R$ und $\kappa$ . . . . .	83
5.2	Vergleich der Spannungsschwingbreiten nach DS 804 mit dem EC 3 . . . . .	86
5.3	Übersicht über die Ergebnisse der Probe G03 mit Messwerten $R =$ 0,10 und umgerechneten Werten $R = 0,50$ . . . . .	89
5.4	Untersuchte FAT-Klassen nach EC 3-1-9 (Teil 1) [13] . . . . .	91
5.5	Untersuchte FAT-Klassen nach EC 3-1-9 (Teil 2) [13] . . . . .	92
5.6	Übersicht über die errechneten Schwingbreiten für $R = 0,10$ . . . . .	120
A.1	Prüfmaschinen Teil 1. Mikroskopie und Spektrometrie . . . . .	252
A.2	Prüfmaschinen Teil 2. Kerbschlag- und Zugversuche . . . . .	253
A.3	Prüfmaschinen Teil 3. Zug- und Dauerschwingversuche . . . . .	254
A.4	Grundwerkstoff G01 – Schleusenkette . . . . .	256
A.5	Grundwerkstoff G01 – Probenentnahme . . . . .	257
A.6	Grundwerkstoff G01 – Probenentnahme . . . . .	258
A.7	Grundwerkstoff G02 – Verbandsstab . . . . .	260
A.8	Grundwerkstoff G02 – Probenentnahme . . . . .	261
A.9	Grundwerkstoff G03 – Stahlkonstruktion des Brückenkrans 1950 . . . . .	263
A.10	Grundwerkstoff G03 – Stahlkonstruktion des Brückenkrans heute . . . . .	264

A.11 Grundwerkstoff G04 – Winkelstütze U-Bahnhof Warschauer Straße, Berlin . . . . .	266
A.12 Grundwerkstoff G04 – Fußpunkt der Winkelstütze im Bahnhof und ausgebaute Stütze . . . . .	267

# 1 Kurzfassung

## 1.1 Kurzfassung – deutsche Version

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden 123 Proben aus ungeschweißtem und geschweißtem Altstahl Dauerschwingversuchen unterzogen. Sie versagten bei Lastspielzahlen von weniger als 10.000.000 oder überlebten das Dauerschwingen.

Die wesentliche Erkenntnis ist, dass das Schweißen ohne signifikanten Einfluss auf die Dauerfestigkeit des Kerbdetails an sich zu sein scheint. Entscheidend scheint die Geometrie der Kerbe zu sein und nicht die in den Altstahl eingebrachte Schweißwärme.

Zur Verifizierung wurden unter anderem Schweißraupen auf nachweislich stark versprödeten Altstahl aufgebracht und wieder abgeschliffen. Diese Proben zeigten dann im Zugversuch teilweise bessere Werte als die unbehandelten Proben; auch die aus diesen Proben ermittelten Wöhlerlinien stellten sich flacher, also langlebiger, dar als die Linien der unbehandelten Proben.

Daneben wurden auch die Kerbklassen FAT 160, FAT 112, FAT 90, FAT 71 und die für Brückenbauwerke unerhebliche FAT 36 untersucht. Nahezu alle untersuchten Proben wiesen Schwingbreiten auf, die im Rahmen des EC 3 zulässig wären.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Schweißwärme einen eher positiven Einfluss auf das Altmaterial hat. In die gleiche Richtung gehen die Erkenntnisse, die gewonnen wurden, als der Altstahl bei rund 1.000 °C geglüht wurde. Die Werte der Kerbschlagarbeit erhöhten sich beträchtlich. Die Zeitdauer, die dieser Zustand anhält, wurde jedoch nicht untersucht. Hier besteht die Möglichkeit weiterer Forschungen.

Hinsichtlich der Restlebensdauer von nicht vorwiegend ruhend beanspruchten Bauwerken scheint jedoch klar zu sein, dass der Einfluss des Schweißens ohne Berücksichtigung bleiben kann.

## 1.2 Abstract – English version

In the present study, 123 samples made from unwelded and welded old steels were subjected to fatigue tests. They failed after less than 10 million cycles or they survived the procedure.

The main result is that welding does not seem to have a significant impact on the fatigue strength of structural details. The geometry of the notch appears to be decisive, not the welding heat applied to the old steel.

For verification purposes, weld beads were deposited on the very brittle old steel and sanded off again. Some of these samples demonstrated better tensile test values than the untreated samples. The fatigue resistance S-N curves were also flatter, i.e. more durable, than the lines of the untreated samples.

In addition, the notch classes FAT 160, FAT 112, FAT 90, FAT 71 and FAT 36 (not important for bridge building) were examined. Almost all examined samples showed stress ranges, which would be allowed under the EC 3.

It can not be excluded that the welding heat has a positive influence on the old steel. The findings concerning the annealed old material (at 1.000 °C) show a similar effect. The values of the impact energy increased significantly. No steps have been taken to examine how long this state is retained. This could be investigated at some time in the future.

With regard to the residual life time of structures primarily exposed to static loads, however, it seems clear that the impact of welding can be left neglected.

## 2 Einleitung

### 2.1 Veranlassung

Das erklärte Ziel dieser Arbeit ist es, Erkenntnisse zu erlangen, die es ermöglichen, vorhandene Altstahlkonstruktionen mithilfe des Schweißens zu reparieren oder zu ertüchtigen. Dabei wird unter anderem Bezug auf Untersuchungen von LÜDDECKE [1] und HELMERICH [2] genommen.

LÜDDECKE hat Untersuchungen an geschweißten Altstahlkonstruktionen vorgenommen, geht hierbei aber wenig auf die Problematik des Verfahrens zur Herstellung des Altstahls ein. Zudem waren die von ihm verwendeten Proben Kleinproben.

HELMERICH hat 2005 an Großproben aus demontierten Bahntrassen geforscht, aber nicht auf das Fügeverfahren des Schweißens abgehoben. Beide Arbeiten sind nicht auf die Praxis im Fertigungsbetrieb und oder im Planungsbüro übertragbar.

Im Zuge dieser Arbeit werden die Untersuchungen, die von LÜDDECKE und HELMERICH veröffentlicht wurden, verbunden und vorangetrieben. Dabei wird einerseits das Herstellungsverfahren der Altstähle berücksichtigt und andererseits an Großproben gearbeitet.

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen werden für den Bereich der „nicht vorwiegend ruhenden Lasten“ durchgeführt. Somit ist sichergestellt, dass sie im Bereich der schwingenden Beanspruchungen Geltung besitzen. Gleichzeitig sind die Erkenntnisse auf den Bereich der „vorwiegend ruhenden Lasten“ übertragbar.

Die im Brückenbau bislang übliche Herangehensweise besteht darin, defekte Teile von Tragwerken aus Altstahl lediglich durch Schraubung zu reparieren. Dazu schreibt die RICHTLINIE 805 der Deutschen Bahn AG (DB AG) [3] im Modul 0401 unter 1 (1):

**„An tragenden Bauteilen von Bauwerken, die vor 1930 erstellt wurden, darf nicht geschweißt werden. Dies gilt auch für Montageschweißungen, die später wieder entfernt werden. An tragenden Bauteilen von Bauwerken, die nach**

**1930 erstellt wurden, darf nur geschweißt werden, wenn die Zulässigkeit aufgrund des verwendeten Materials eindeutig aus den Unterlagen hervorgeht oder durch Materialuntersuchungen belegt wird.“**

Im Bereich des Straßenbaues gelten die Regelwerke des damaligen Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [4] und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST). Hier wird zum Schweißen an Straßenbrücken aus Altstahl keine explizite Angabe gemacht.

Im Geltungsbereich der österreichischen Normung ONR 24008 [5, S. 5] gilt die zitierte Forderung für Eisenbahn- und Straßenbrücken nahezu in gleichem Wortlaut. Die Schweizer Vorschrift I-AM 08/2002 [6] betrifft genietete Eisenbahnbrücken und ist nicht mehr in Gebrauch. Das zeigt, dass auch im deutschsprachigen Ausland offenbar keine wissenschaftlich fundierten Erkenntnisse zu Schweißungen an Altstahl vorliegen.

Mit steigenden Kosten für Neubauten und erhöhten Schwierigkeiten in den Planfeststellungsverfahren wird es zunehmend interessant werden, vorhandene Konstruktionen „zu retten“, indem sie für veränderte, vornehmlich erhöhte Lasten nachgewiesen werden. In den meisten Fällen wird das ohne den Einbau zusätzlichen Materials nicht möglich sein. Dieses Vorgehen wird Ertüchtigung genannt.

Gleichfalls von großem Interesse ist die Erhaltung von Bauwerken unter gleichbleibenden bestehenden Lastkonfigurationen. Die Bauwerke haben Schaden genommen und müssen repariert werden, andernfalls würde die Bauwerkszuverlässigkeit leiden. Dieses Vorgehen wird Reparatur genannt.

In beiden Fällen kann das vorhandene Konstruktionsmaterial durch zusätzliches Material ergänzt werden, sei es als Ertüchtigungs- oder als Reparaturmaterial.

Die verwendbaren Materialien werden in erster Linie aus Neustahl sein, obwohl einzelne Reparaturen auch mit Altstahl möglich wären. Unabhängig davon wird in beiden Fällen an bestehendem Altstahl gearbeitet.

Laut den Angaben von GEISSLER, GRASSE und BRANDES [7, S. 487] sind von den rund 8.000 Stahlbrücken im Netz der DB AG 50 % älter als 80 Jahre, 40 % gar älter als 100 Jahre. Hinzu kommen noch Brücken aus dem Bereich des Straßenwesens. Insgesamt werden rund 6.000 Brücken auf ein Alter von mindestens 80 Jahren geschätzt.

Allein dieses Faktum zeigt auf, wie wichtig es werden wird, nähere Erkenntnisse über das Reparieren von alten Stahlbrücken mit wirtschaftlichen und modernen

Verfahren zu erlangen. Als mögliches Verfahren zur Reparatur – oder auch zur Ertüchtigung – kann auch das Schweißen in Betracht kommen.

In einem Beitrag in den VDI-NACHRICHTEN [8] wird 2013 dargelegt, dass allein im Bundesland Nordrhein-Westfalen 49 Autobahnbrücken aufgrund des gestiegenen Verkehrsaufkommens neu errichtet werden müssen. Die Stahl-Autobahnbrücke der Bundesautobahn A 1 über den Rhein, errichtet 1965, wird durch Reparaturschweißen ertüchtigt. Das bekräftigt die Notwendigkeit der Forschung auf dem Gebiet der Reparaturschweißung an älteren Brücken.

Nach Überzeugung des Verfassers sollte es möglich sein, geeignete Verfahren zu entwickeln, die sowohl der Fertigung durch den Stahlbaubetrieb als auch der Nachweisführung nach den Forderungen der DB AG Genüge tun und es erlauben, an Konstruktionen aus Altstahl zu schweißen, auch an solchen, die vor 1930 errichtet wurden.

Das Schweißen hat sich als wirtschaftliches und prozesssicheres Verfahren im Stahlbau bewährt. Es wird erfolgreich in unterschiedlichen Ausprägungen – in der Schweißtechnik Prozesse genannt – durchgeführt. Dazu zählen auch Prozesse, die es erlauben, auf Baustellen zu schweißen. Es handelt sich hierbei in erster Linie um das Lichtbogenhandschweißen (E, Prozess 111 nach DIN EN ISO 4063 [8]) und das Metall-Schutzgasschweißen (MSG, Prozess 135 nach [9]).

Das Bild einer Lokschuppenstütze (Abbildung 2.1, S. 6) zeigt eine mögliche Anwendung des Reparaturschweißens. Die vorhandene Stütze aus zwei U-Profilen in der Waschhalle eines Ringlokschuppens der DB AG ist stark korrodiert. Sie zeigt großflächigen Lochfraß im Bereich der Stege. Hier sollte es möglich sein, die Stege mit geeigneten Schweißverfahren und Nachweisformaten kostenoptimiert zu reparieren.

## 2.2 Zielsetzung

Im Zuge der vorliegenden Arbeit werden anhand von Proben Untersuchungen durchgeführt, die die Schweißverbindung Altstahl an Altstahl und Altstahl an Neustahl analysieren. Diese Proben werden durch metallurgische Verfahren analysiert, sie werden nach visueller Prüfung Dauerschwingversuchen unterzogen und aus den Erkenntnissen nachfolgend Ansätze erarbeitet, die in die Vorschriften, zum Beispiel die der DB AG, einfließen könnten.



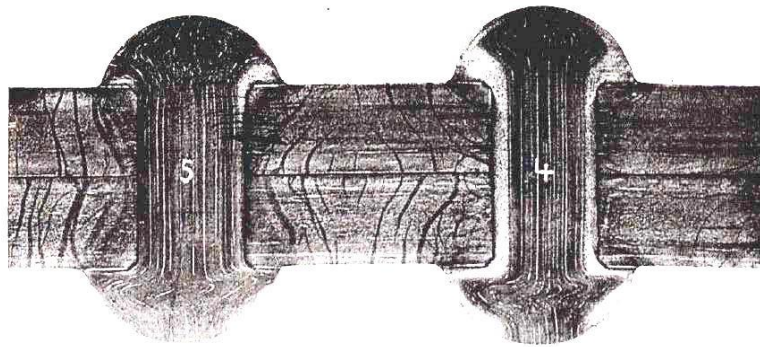
**Abbildung 2.1:** Stützenfuß einer Hallenstütze in Hamburg-Eidelstedt (Ringlokschuppen) mit massivem Lochfraß (Aufnahme des Verfassers)

Die Vorgeschichte, hier gleichzusetzen mit der Vorschädigung, der verwendeten Bauteile wird mithilfe von Makroätzverfahren, zum Beispiel nach Fry oder Adler, ermittelt und mit den rechnerischen Vorschädigungen verglichen.

Die Ätzungen nach Fry oder Adler ermöglichen es, Kaltverformungen sichtbar zu machen. Die sichtbaren Ergebnisse werden Fry'sche Kraftwirkungslinien genannt. Sie treten auf, wenn ein Stahl über seine Streckgrenze, also plastisch, beansprucht worden ist. Allerdings darf der untersuchte Stahl nicht mit Aluminium überdesoxidiert worden sein. Schon DAMEROW [10, S. 143] wies zur Abnahme von Kesselblechen darauf hin.

Die Abbildung 2.2 (S. 7) [10] gibt einen Eindruck davon, warum Risse an genieteten Fachwerkkonstruktionen von den Nieten ausgehen und diese im Rahmen der Bauwerksinspektion „abgeklopft“ werden sollen. Dort sind die Knotenbleche stark kaltverformt, damit kaltverfestigt und kaltversprödet. Hierzu hat CASU





**Abbildung 2.2:** Kraftwirkungslinien in einem durch Nietdruck hoch beanspruchten Kesselblech; daher auch stärkere Ausbildung an der Nietkopfbegrenzung

[11] weiterführende Untersuchungen (Abbildung 2.3, S. 8) durchgeführt. Es zeigt sich eine erstaunliche Übereinstimmung zwischen der rechnerischen Verformung und den Fry'schen Kraftwirkungslinien.

Diese Ätzverfahren können aufzeigen, inwieweit die Proben bereits kaltverformt sind. Das könnte zum Beispiel durch ein über eine Brücke rollendes Rad erfolgt sein.

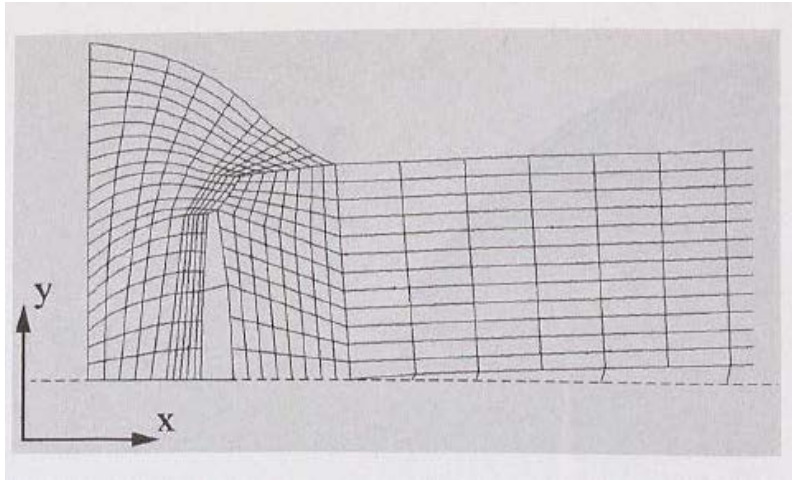
Die verwendeten Proben sind hinsichtlich ihrer Beanspruchung und Nutzungsdauer detailliert bekannt. Somit kann auf den Zusammenhang zwischen tatsächlicher und rechnerischer Schädigung geschlossen werden.

Hierbei wird gegenüber der Arbeit von LÜDDECKE [1] eine wesentliche Erweiterung um den Teil der Vorschädigung erreicht. Zu diesem Zweck werden die vorgenannten metallografischen Verfahren bis hin zur Schweißmetallurgie angewendet.

Das bruchmechanische Untersuchen der auftretenden Effekte, zum Beispiel nach den Erkenntnissen von GROSS und SEELIG [12], kann entfallen, da sich die Proben unempfindlicher darstellen als erwartet.

Im Zuge einer möglichen Schweißung werden Eigenspannungen erzeugt, die durch die einschlägigen Bemessungsvorschriften DIN EN 1993-1-9 und DIN EN 1993-2 (Eurocode 3) [13] [14] in Kerbfälle eingruppiert werden. Unter Verwendung der geeigneten Wöhlerlinien werden daraus die Betriebsfestigkeiten ermittelt.

Die Arbeit wird weiterhin zum Thema haben, herauszufinden, inwieweit sich die Schweißprozesse am Altstahl möglicherweise positiv auf die Gefügestände des



**Abbildung 2.3:** Rechnerische Simulation der Verformungsfigur nach Abkühlung einer Heißniete

Bestandsmaterials auswirken – vergleichbar einer Vergütungslage.

Abschließend werden alle Ergebnisse zusammengefasst und in ein Nachweisformat überführt, das den Anforderungen der RIL 805 [3] und der damit verbundenen Regelwerke der Eurocodes genügt.

Die Bestimmung der Restlebensdauer von Eisenbahnbrücken nach [3] folgt einem vierstufigen Bewertungsschema. Dieses liefert eine relativ zuverlässige Einschätzung der verbliebenen Tragsicherheit des Brückenbauwerkes.

- Bewertungsstufe 1: Abschätzung der Tragsicherheit durch ingenieurmäßige Generalisierung
- Bewertungsstufe 2: Überschlägige Ermittlung der Tragsicherheit durch Nachrechnung der Bestandsstatik
- Bewertungsstufe 3: Genaue Ermittlung der Tragsicherheit durch komplexe Rechenmethoden (gegebenenfalls Remodellierung des Tragwerks)
- Bewertungsstufe 4: Messwertgestützte Ermittlung der Tragsicherheit und Kalibrierung der Berechnungsergebnisse

Neben dem Ergebnis der Untersuchung der Tragsicherheit wird für Eisenbahnbrücken gemäß [3] ein Ermüdungsnachweis für stählerne Brücken gefordert. Dieser darf entfallen, wenn die Brücken nicht mehr als 60 Jahre in Betrieb sind und wenn **„die Brücken eine ausreichende Tragsicherheit und einen guten baulichen Zustand (...) haben“**.

Dieser Nachweis ist nach RIL 805, Modul 805.0201, Seite 11, als Restnutzungsdauernachweis auf Basis des Wöhlerlinienkonzeptes zu führen. Es handelt sich um einen Betriebsfestigkeitsnachweis. Hierzu wird der ermüdungsrelevante Belastbarkeitswert  $\beta_{D,UIC}$  verwendet. Er ermittelt sich nach der Gleichung:

$$\beta_{D,UIC} = \frac{zul\Delta\sigma_{Be,\kappa}}{\phi \cdot max\Delta\sigma_{UIC}} \quad (2.1)$$

In dieser Gleichung bilden ab:

- $zul\Delta\sigma_{Be,\kappa}$  die zulässige Spannungsdoppelamplitude beim Betriebsfestigkeitsnachweis in Abhängigkeit von Material, Kerbfall und Spannungsverhältnis,
- $max\Delta\sigma_{UIC}$  die maximale Spannungsdifferenz beim Lastbild UIC 71 ohne Verteilung der Einzellasten des Lastbildes und
- $\phi$  den Schwingfaktor nach RIL 804 [15] (vormals DS 804) der DB AG.

Ist der Wert  $\beta_{D,UIC} > 1,05$  für den Grundwerkstoff bzw.  $> 1,20$  für geschweißte Konstruktionen, gilt der Nachweis der Ermüdung als erbracht. Wird dieser Wert unterschritten, sind Überlegungen zur Restnutzungsdauer erforderlich.

Die RIL 805 [3] enthält Angaben zu den zulässigen Schwingungsdoppelamplituden  $zul\Delta\sigma_{Be,\kappa}$  der Grundwerkstoffe und Verbindungen.

Die Restnutzungsdauer  $R$  des Brückenbauwerkes ermittelt sich im Nachgang nach [3] mit Hilfe der nachfolgenden Gleichung:

$$R = \frac{1 - D_{Verg}}{0,01 + D_{Zuk}} - A \leq 50 \text{ Jahre} \quad (2.2)$$

In dieser Gleichung bilden ab:

- $D_{Verg}$  den Wert für den fiktiven Schaden in der Vergangenheit,
- $D_{Zuk}$  den jährlich akkumulierten Schaden in der Zukunft und
- $A$  die Differenz aus dem tatsächlichen Jahr der Berechnung und dem Jahr 1876 (geschraubte Bauwerke, Kerbfallgruppe W nach Anlage 5) oder dem Jahr 1936 (geschweißte Bauwerke, Kerbfallgruppe K nach Anlage 6).

Die Nachweise für Straßenbrücken nach [4] folgen einem ähnlichen Schema, zielen jedoch auf die Fachberichte des DIN bzw. auf die entsprechenden Eurocodes ab. Für Stahlbauwerke gilt hier die Norm DIN EN 1993 (EC 3) [14].

- Stufe 1: Nachrechnung nach DIN EN 1993 – für Stahlbauwerke
- Stufe 2: Nachrechnung nach DIN EN 1993 mit den Ergänzungen nach [4]
- Stufe 3: Messwertgestützte Ermittlung der Tragsicherheit und Validierung des Berechnungsmodells Sonderfall in Abstimmung mit den obersten Straßenbaubehörden
- Stufe 4: Anwendung wissenschaftlicher Methoden Sonderfall in Abstimmung mit den obersten Straßenbaubehörden

Die Anforderungen für Straßenbrücken aus [4] enthalten für „ältere Brücken“ generell einen Ermüdungsnachweis.

In beiden vorgenannten Fällen ist jedoch kein Ansatz für die Bewertung von Konstruktionen oder Konstruktionsteilen vorgegeben, die aus Altstahl hergestellt und mit Neustahl verstärkt wurden. Weiterhin sind keine Vorgaben gemacht, die erläutern, wie bei einem Altstahl vorzugehen ist, wenn dieser durch Schweißung verändert wurde.

### 2.3 Einfluss der DIN EN 1993 (Eurocode 3)

Die DB AG nimmt im derzeitigen Stand der RIL 805 [3] nur wenig Bezug auf den Eurocode 3 (EC 3) und berücksichtigt damit auch nicht den für nicht vorwiegend ruhend beanspruchte Bauteile wesentlichen Teil 9 des EC 3 [13], der regelt, wie mit Ermüdung von Bauteilen umzugehen ist.

Da aber der EC 3 – wie alle Eurocodes – seit dem 1. Juli 2012 im Geltungsbereich des deutschen Normwerkes verbindlich anzusetzen ist, wird die DB AG nicht umhinkönnen, ihr bahnbezogenes Regelwerk auf die Eurocodes umzustellen.

Dieser Sachverhalt wird dadurch bestärkt, dass das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) – jetzt Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) – in Zusammenarbeit mit der BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN (BASt) in der „Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)“ die Eurocodes in Anlage 3 [4, A3-3] als normative Grundlage für das Teilsicherheitskonzept nennt.

In Abschnitt 13 der Richtlinie wird auf Stahl- und Verbundbrücken abgehoben und materialseitig auf die DIN-Fachberichte 103 [16] und 104 [17] verwiesen. Lastseitig verweist die Nachrechnungsrichtlinie auf den DIN-Fachbericht 101 [18]. Alle vorgenannten DIN-Fachberichte aber basieren auf den damaligen Vornormen der Eurocodes 1, 3 und 4.

Somit basiert die Nachrechnungsrichtlinie für Stahlbrücken auf dem jetzt gültigen EC 3. Diesen Weg wird auch die DB AG gehen müssen. Im EC 3 wird in Teil 1-9 [13] geregelt, wie mit ermüdungsgefährdeten und ermüdeten Bauteilen umzugehen ist. Der rechnerische Nachweis ist wie folgt zu führen:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \quad (2.3)$$

In dieser Gleichung werden verwendet:

- $\gamma_{Ff}$  als Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungslasten,
- $\Delta\sigma_{E,2}$  als schadensäquivalente Spannungsspielbreite bei  $2 \cdot 10^6$  Schwingspielen,
- $\Delta\sigma_C$  als Ermüdungsfestigkeit am Bezugswert von  $2 \cdot 10^6$  Schwingspielen und
- $\gamma_{Mf}$  als Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit, abhängig vom Bemessungskonzept.

Die Nachweise gegen Ermüdung dürfen nach EC 3 nach den Bemessungskonzepten der Schadenstoleranz oder der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung geführt werden.

Wie in den DIN-Fachberichten werden die Nachweise der Ermüdungsfestigkeit nach EC 3 auf Gebrauchslastniveau ermittelt. Die Sicherheit aufseiten der Festigkeit hängt von den zu erwartenden Folgen eines Schadens und der Schadenstoleranz des Bauteils ab. Ist die Schadensfolgeklasse hoch und die Toleranz des Bauteiles niedrig, wird ein großer Teilsicherheitsbeiwert angesetzt.

Es sind in der Regel folgende Teilsicherheitsbeiwerte nach EC 3 anzusetzen:

- Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungslasten  $\gamma_{Ff} = 1,00$
- Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungsfestigkeiten  $\gamma_{Mf} = 1,00$  bis  $1,35$

Zum Vergleich sei angemerkt, dass der DIN-Fachbericht für Eisenbahnbrücken einen Höchstwert von  $\gamma_{Mf} = 1,25$  vorsah. Nach dem EC 3 werden Nennspannungen nach der technischen Biegelehre ermittelt und mit den Ermüdungsfestigkeitskurven (Kerbfällen) verglichen (Nennspannungskonzept).

Weiterhin können Strukturspannungen unter Berücksichtigung von lokalen Spannungsamplituden verwendet werden. Örtliche Spannungsspitzen, zum Beispiel an Schweißnahtübergängen, werden hierbei berücksichtigt (Strukturspannungskonzept).

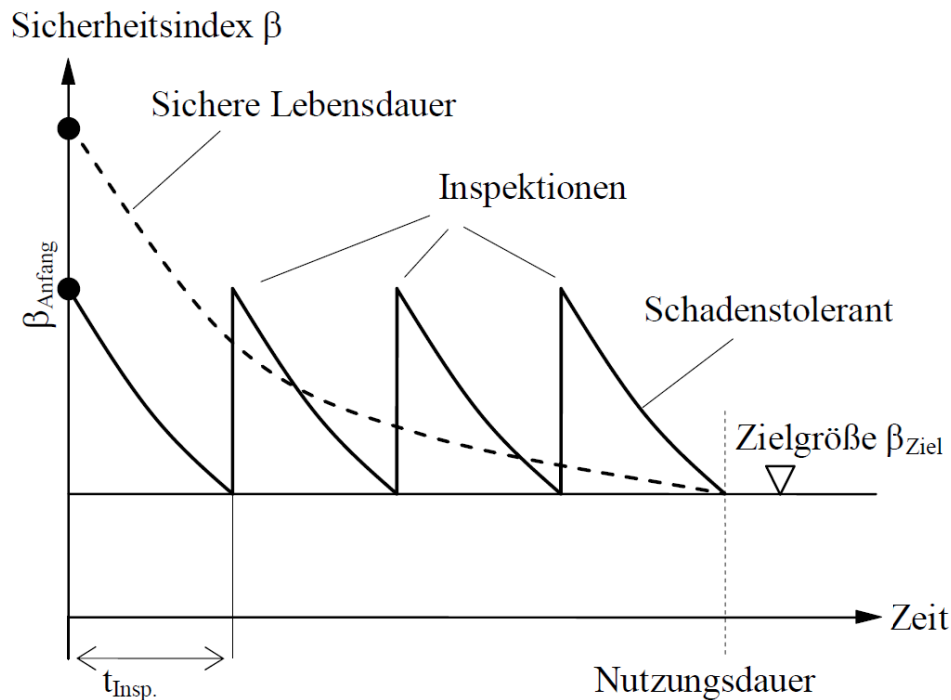
### 2.3.1 Schadenstoleranzkonzept

Beim Konzept der Schadenstoleranz wird angenommen, dass ein Schaden in der Struktur existiert und dass dieser Schaden über die Betriebsdauer anwächst, bis er eine detektierbare Größe erreicht. Zum Zeitpunkt der Entdeckung des Schadens weist das Tragwerk jedoch noch ausreichende Tragreserven auf, die eine Reaktion auf das Schadensereignis zulassen. Diesem Konzept folgend, werden regelmäßige Bauwerksinspektionen erforderlich. Im Wirkungsbereich der Bahn wäre das zum Beispiel eine Brückeninspektion. Bei einer hohen Schadensfolge ist hier mit  $\gamma_{Mf} = 1,15$  zu rechnen.

### 2.3.2 Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung

NUSSBAUMER und GÜNTHER erläutern hierzu in [19, S. 401], dass dieses Verfahren angewendet wird, wenn eine planmäßige Inspektion nicht vorgesehen oder nicht möglich ist. Es kommt auch zur Anwendung, wenn Rissbildung schnell zu einem Schadensereignis führen kann.

Diesem Konzept folgend, sind die Sicherheiten höher zu wählen. Bei einer hohen Schadensfolge ist hier mit  $\gamma_{Mf} = 1,35$  zu rechnen. Daraus folgt, dass das Sicherheitsniveau beider genannten Konzepte zu Beginn der Bauwerksnutzung unterschiedlich hoch ist, sich jedoch über die Nutzungsdauer annähert und einen gemeinsamen Sicherheitshorizont anstrebt. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 2.4 (S. 13) dargestellt.



**Abbildung 2.4:** Zeitlicher Verlauf des Sicherheitsindex  $\beta$  in Abhängigkeit von der Wahl des Bemessungskonzeptes und der Schadensfolge (Abbildung entnommen aus [19])

### 2.3.3 Nachweis bei periodischer Beanspruchung

Bei periodischer Beanspruchung – zum Beispiel wirbelerregter Querschwingung aus Wind – darf nach EC 3 der Nachweis der Ermüdung gegen die Dauerfestigkeit geführt werden. Hierzu führen KINDMANN und STRACKE in [20, S. 407] Näheres aus. Diese Nachweisführung ist für die vorliegende Arbeit nicht von Belang und wird daher nicht weiterverfolgt.

### 2.3.4 Nachweis bei nicht periodischer Beanspruchung

Bei nicht periodischer Beanspruchung, wie sie zum Beispiel bei einem Brückenbauwerk vorliegt, werden die Nachweise gegen Ermüdung nach Hypothesen der Schadensakkumulation geführt. Das entspricht dem Vorgehen der RIL 805 [3] (siehe dort den Teil 805.0201, Abschnitt 3, Restnutzungsdauer).

Die Akkumulation von Schäden kann nach unterschiedlichen Verfahren erfolgen. Im Stahlbau hat sich die Hypothese nach Palmgren-Miner durchgesetzt. Diese ist im EC 3 für Normalspannungen mit einer Wöhlerlinienneigung von  $m=3$  festgelegt und nach Haibach ergänzt. Damit fällt die Wöhlerlinie mit einer verminderten Neigung von  $m = 5$  weiter ab.

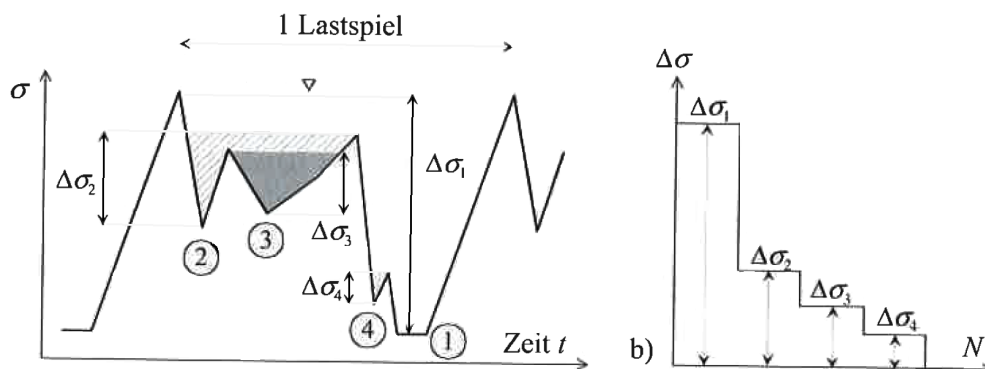
Die Schadenssumme  $D_d$  errechnet sich aus den Einzelschädigungen wie folgt:

$$D_d = \sum_{i=0}^N \frac{n_i}{N_i} \quad (2.4)$$

- $n_i$  ist die Anzahl der Schwingspiele der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_i$  während der Nutzungsdauer,
- $N_i$  die maximal zulässige Anzahl der Schwingspiele der Spannungsschwingbreite  $\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf} \cdot \Delta\sigma_i$  für den untersuchten Kerbfall.

### 2.3.5 Zählverfahren

Um die Anzahl der Schwingspiele festzustellen, sind Zählverfahren erforderlich. Aus deren Ergebnissen werden Lastkollektive gebildet. Im EC 3 ist beispielhaft die Reservoirmethode als Zählverfahren genannt. SEESSELBERG hat dieses Verfahren in [21] näher erläutert.



**Abbildung 2.5:** Reservoirmethode (Abbildung entnommen aus [21, S. 196])



### 2.3.6 Schlussfolgerung

Die RIL 805 kennt nur die Kerbfälle W I (Werkstoff), W II (Lochstab) und W III (Nietverbindung). Für andere Bauteile wird auf die DS 804 [22] verwiesen – den Vorläufer der RIL 804. Die RIL 804 nimmt Bezug auf den EC 3, die DS 804 nicht.

Aus dem Beschriebenen kann gefolgert werden, dass die RIL 805 der DB AG geändert werden wird, damit sie dem Stand des europäischen Normwerkes entspricht.

Deshalb werden im Zuge dieser Arbeit alle Betrachtungen im Sinne des EC 3 geführt, und bei unterschiedlichen Sichtweisen zwischen RIL 805 und EC 3 wird der Eurocode zugrunde gelegt. Somit blieben die Erkenntnisse, die aus dieser Arbeit gezogen werden können, auch nach einer etwaigen vollständigen Umstellung des Regelwerkes der Bahn gültig.

## 2.4 Stand der Forschung

Neuere Arbeiten zur Lebensdauer von reparaturgeschweißten Bauteilen wurden von PASTERNAK und CHWASTEK [23] [24] durchgeführt. Sie kommen zu dem Schluss, dass reparaturgeschweißte Nähte den Originalschweißungen hinsichtlich der Schwingfestigkeit nicht unterlegen sind. Sie weisen eher höhere FAT-Klassen auf als vom Normwerk angegeben. Allerdings beziehen sich beide Untersuchungen auf Neustähle.

Die Forschung hat hinsichtlich des Schweißens an Altstahl jedoch keinen einheitlichen Stand. Die Aussagen unterscheiden sich stark. Wie LÜDDECKE [1] gezeigt hat, ist es sehr wohl möglich, an Altstahl erfolgreich Schweißungen vorzunehmen. Zum gleichen Ergebnis kam MÖLL [25], jedoch auf gänzlich anderem Wege.

Im Zuge eines Forschungsvorhabens der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) hat HELMERICH [2] untersucht, inwieweit bestehende genietete Stahlkonstruktionen auch nach jahrzehntelanger Nutzung noch eine Restnutzungsdauer aufweisen. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Konstruktionen aufgrund ihrer hohen Tragreserven auch in Zukunft noch betrieben werden könnten. Bei den Untersuchungen wurden zielgerichtet diejenigen Querschnittsteile mit Dehnmessstreifen bestückt, an denen die höchsten Spannungen zu erwarten waren.

Somit kann unterstellt werden, dass sich Inspektionen und Messungen bewährt haben, wenn die Ermüdungssicherheit genieteter Stahlbrücken zu bewerten ist. Aussagen zu geschweißten – planmäßig geschweißten oder reparaturgeschweißten – Querschnittsteilen wurden nicht gemacht.

LÜDDECKE [1] untersuchte häufig eingebaute Altstähle auf ihre prinzipielle Schweißeignung. Er konzentrierte sich dabei auf unberuhigt vergossene Baustähle mit ausgeprägten Speckschichten.<sup>1</sup> Die Dicken der Speckschichten erforderten es, die Einbrandtiefe des gewählten Schweißverfahrens E anzupassen, sodass die Einbrände nicht durch die Speckschichten hindurch in die Seigerungszone reichten. Im Zuge dieser Arbeit hat LÜDDECKE die Dicken der Speckschichten experimentell ermittelt und die Schweißparameter zu einer altstahlgerechten Schweißung mit dem Verfahren E angegeben.

Weiterhin wurden Kleinproben aus unberuhigt vergossenem Altstahl mit Neustahl verschweißt und zur Untersuchung der Eignung für nicht vorwiegend ruhende Belastung Ermüdungsversuchen unterzogen. Die ermittelten Lastwechsel beim Bruch der Probe waren denen heutiger moderner Stähle ähnlich.

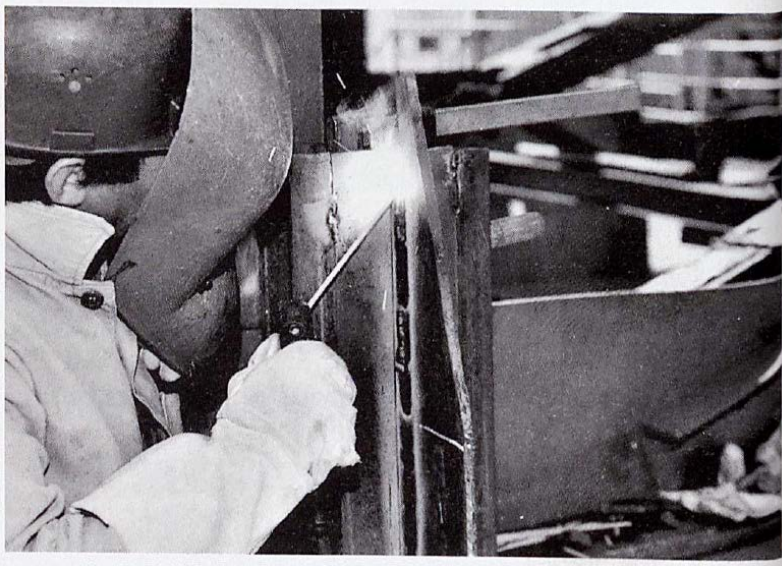
LÜDDECKE hatte somit 2006 in Erweiterung zu HELMERICH gezeigt, dass das Schweißen von Altstahl und Neustahl prinzipiell möglich ist. Leider nahm er in seiner Arbeit keine konsequente Trennung der Altstähle nach ihrer Erzeugung vor.

Die Arbeiten von STEIDL [26] fassen die Erkenntnisse über die Stähle der Brücken und ihrer Schweißungen der Jahre 1920 bis 1930 mit Stand von 1972 zusammen. Er stellte fest, dass Stähle, die vor 1940 erschmolzen wurden, nicht automatisch schweißgeeignet seien und dass eine Schweißung in der gereinigten Speckschicht der Profile zu erfolgen habe.

Die Untersuchungen von FISCHER und LORENZ [27, S. 6] wiesen 2002 nach, dass die vorgenommenen Schweißungen an einer historischen Konstruktion aus Flussstahl ohne negative Einflüsse auf die Materialeigenschaften und die Ermüdungsfestigkeiten waren. Sie führten an einer genieteten Stahlbrücke der U-Bahn-Linie 1 in Berlin Bestandsuntersuchungen und Nachrechnungen durch und stellten fest, dass das Sicherheitsniveau ausreichend zum Weiterbetrieb der Stahlkonstruktion war.

---

<sup>1</sup> Die Speckschicht ist ein von Verunreinigungen freier Bereich am Rand eines Walzprofils – siehe hierzu auch Abbildung 3.19 auf S. 57.



**Abbildung 2.6:** Schweißarbeiten am „Eisernen Steg“ nach [25], Arbeitsprobe unter Baustellenbedingungen

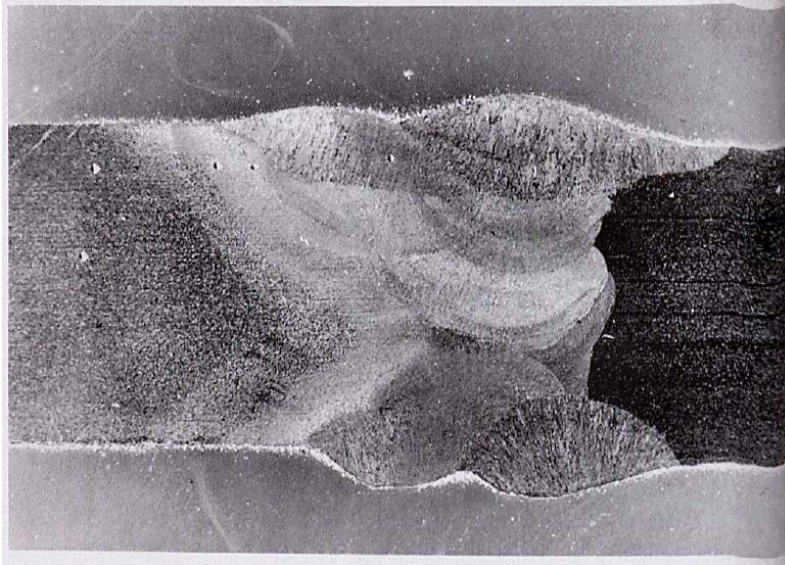
MÖLL [25] zeigte 1997 auf, dass bei sorgfältiger Vorbereitung – zum Beispiel durch Arbeitsproben (Abbildung 2.6, S. 17) – und Recherche der Bestandssituation sehr wohl eine erfolgreiche Reparatur an Konstruktionen aus Altstahl erfolgen kann. Seine Folgerung für eine erfolgreiche Schweißung war, möglichst Stumpfnähte unter Verwendung basisch umhüllter Elektroden zu verwenden. Diese würden den eventuell vorhandenen lamellenartig aufgebauten Stahl zusammenhalten (Abbildung 2.7, S. 18 ).

Somit stehen die Erkenntnisse von MÖLL [25] einerseits und STEIDL [26] in Übereinstimmung mit LÜDDECKE [1] andererseits diametral zueinander.

Die vorgenannten Quellen zum Schweißen an Altstahl lassen erkennen, dass die Forschung auf diesem Gebiet nur langsam vorankommt. Es bestand in den vergangenen Jahrzehnten kaum Bedarf daran, Konstruktionen aus Altstahl zu sanieren. Diese Bauwerke wurden in der Regel abgerissen und – wenn erforderlich – mit schweißtechnisch unproblematischen Stählen neu errichtet.

Daraus resultiert vermutlich auch, dass mangels genauerer Kenntnis die Forderungen und Empfehlungen konservativ sind. Die Forderungen der Bahn [3] lassen keinen Spielraum zu.

Auch die Forschung äußert sich entsprechend: **„Schweißen ist nur in Sonderfällen möglich“** [7, S. 511].

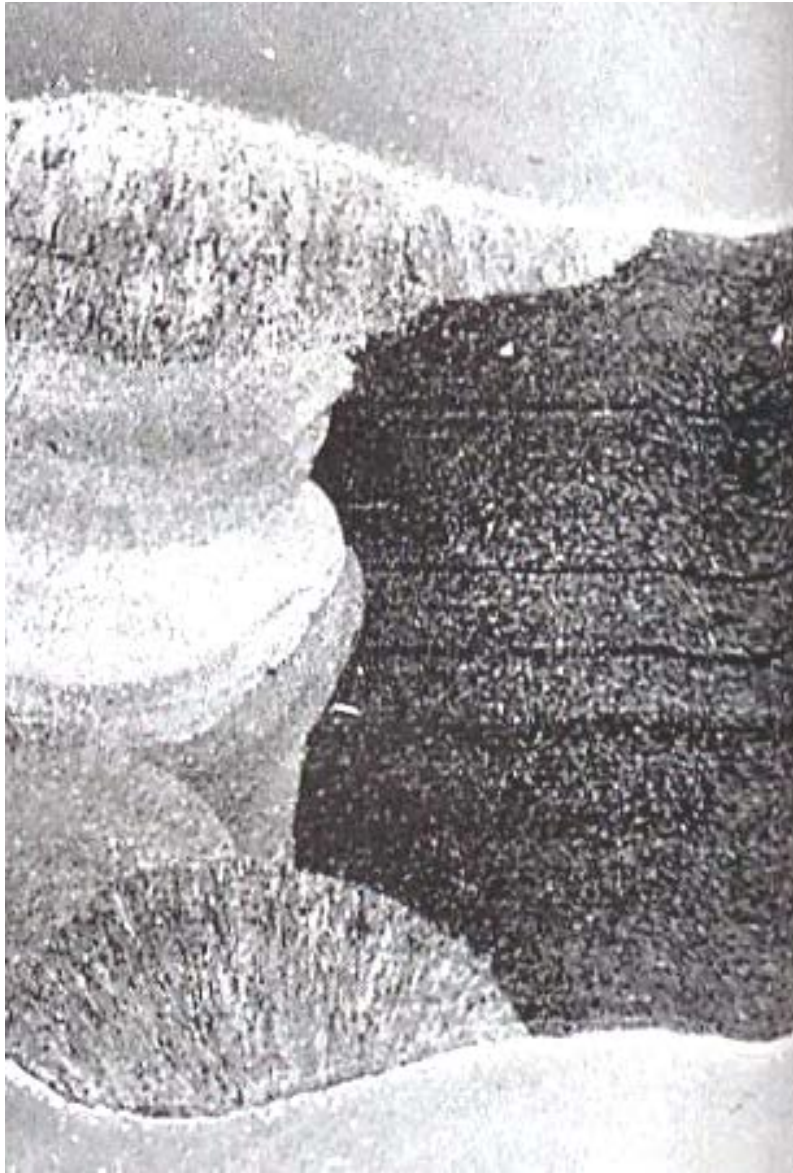


**Abbildung 2.7:** Schweißarbeiten am „Eisernen Steg“ nach [25], Schliffbild einer Vollnaht aus einer Arbeitsprobe, rechts Altstahl, lamellenartig

Das gilt es zu hinterfragen. Die bisherigen Arbeiten befassen sich nicht mit der Beeinflussung der Restlebensdauer von Konstruktionen aus Altstahl, an denen zum Zweck der Reparatur geschweißt wurde. Eine eventuelle Beeinflussung der Werkstoffzustände der wärmebeeinflussten Zone des Grundwerkstoffes wurde nicht untersucht.

SCHUSTER beschreibt in einem Forschungsantrag der SLV Halle GmbH den Antrieb wie folgt:

**„Wurde und wird bisher an Konstruktionen aus Altstahl auf eine wirtschaftlich ausführbare schweißtechnische Instandsetzung häufig verzichtet, eröffnet sich durch die Berücksichtigung der Ergebnisse des beantragten Vorhabens eine neue Herangehensweise an die Bewertung der Restlebensdauer unter besonderer Berücksichtigung des Schweißens. Somit eröffnet das Vorhaben u. U. den Erhalt vieler Altstahlkonstruktionen unter Einsatz des Reparaturschweißens bei gleichzeitiger Abschätzung dessen Beeinflussung der Restlebensdauer“** [28, S. 24].



**Abbildung 2.8:** Schweißarbeiten am „Eisernen Steg“ nach [25], Schliffbild einer Vollnaht aus einer Arbeitsprobe, rechts Altstahl, lamellenartig, Ausschnitt vergrößert und bearbeitet





## 3 Die Stähle, ihre Herstellung und ihre Eignung zum Schweißen

### 3.1 Der Begriff der Schweißbarkeit

Der Begriff der Schweißbarkeit ist komplex. Er beinhaltet dem Grunde nach drei unterschiedliche Sachverhalte, die Schweißeignung, die Schweißmöglichkeit und die Schweißsicherheit. Nähere Erläuterungen zum Metallschweißen gibt die DIN 8528-1 [29]. Ein Bauteil ist nur dann sicher schweißbar, wenn alle drei Aspekte aufeinander abgestimmt und für sich erfüllt sind (siehe hierzu Abbildung 3.1).

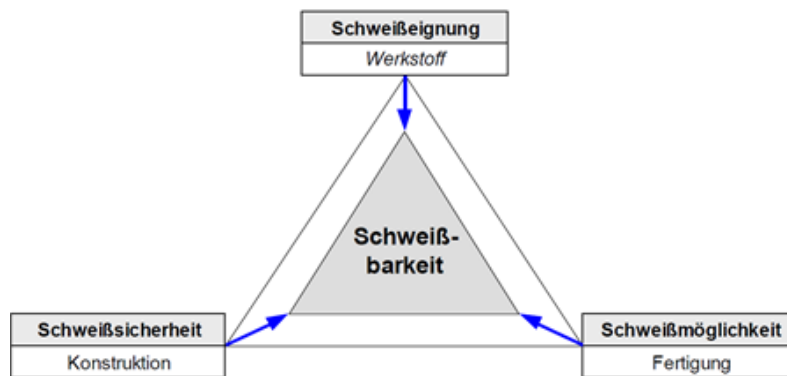


Abbildung 3.1: Das Dreieck der Schweißbarkeit nach DIN 8528-1 [29]

BECKERT und HEROLD [30, S. 1] schreiben: „**Die Schweißbarkeit ist ein Komplex von werkstofflichen, konstruktiven und fertigungstechnischen Komponenten. Sie ist gegeben, wenn durch einen Schweißprozess eine Konstruktion aus einem metallischen Werkstoff so hergestellt werden kann, dass sie alle betrieblichen Anforderungen ohne Schädigungen erfüllt.**“

In den Unterpunkt der **Schweißeignung** fließen die technologischen Eigenschaften der **Werkstoffe** ein. Dazu zählen insbesondere seine Neigungen zu Seigerungen, Heißrissen und Einschlüssen, aber natürlich neben anderen Aspekten auch insbesondere das Verhalten der Festigkeit, der Zähigkeit und der thermischen Leitfähigkeit.

Im Unterpunkt der **Schweißsicherheit** werden die Belange der **Konstruktion** subsumiert. Hier werden zum Beispiel Kerbform und -wirkung, Schweißnahtdi-

cken, Art, Größe und Geschwindigkeit der Beanspruchung und der Kraftfluss im Bauteil berücksichtigt, aber auch zum Beispiel Nahtform und Werkstückdicke.

Der Unterpunkt der **Schweißmöglichkeit** berücksichtigt alle Belange der **Fertigung**. Hier werden zum Beispiel das Schweißverfahren, die Schweißfolge, die erforderlichen Wärmebehandlungen und die Energieführung betrachtet.

Die in dieser Arbeit vornehmlich zu berücksichtigenden Aspekte sind die Schweißeignung (Werkstoff) und die Schweißsicherheit (Konstruktion). Die Schweißmöglichkeit (Fertigung) muss als gegeben unterstellt werden, wenn Stahlbaubetriebe die Arbeiten ausführen.

Da Altstähle bearbeitet werden, ist die Kenntnis der Schweißeignung der Werkstoffe eine zentrale Frage. Diese Frage kann in allgemeingültiger Form für die Vielzahl der in Betracht kommenden Werkstoffe (Altstähle) nicht beantwortet werden.

Hierbei müssen für die infrage kommenden Möglichkeiten des Materials angepasste Ansätze erarbeitet werden, die die Schweißeignung des Materials in (gewissem) Umfang absichern. Da einzelne Stähle einer nachgewiesenen Alterung unterliegen, ist das Einsehen und Berücksichtigen bestehender Konstruktionsunterlagen nicht ausreichend. Die Untersuchung in situ ist geboten.

Zu den wesentlichen Elementen zählt die chemische Zusammensetzung des Materials. Hierbei sind die Gehalte an Kohlenstoff, Schwefel, Phosphor und Stickstoff für die Schweißeignung entscheidend.

Stähle mit Kohlenstoffgehalten von mehr als 0,210 % (Gewichtsprozenten) gelten als nur noch bedingt schweißgeeignet. Bei Gehalten von je 0,065 % für Schwefel und Phosphor und von 0,010 % an Stickstoff gilt ebenfalls nur bedingte Schweißeignung. Diese Angaben entstammen der inzwischen zurückgezogenen DIN 17100 [31] für Blechdicken  $t < 16$  mm (siehe hierzu Tabelle 3.1, S. 23).

In der Nachfolgenorm DIN EN 10025:1991-01 [32] mit der Änderung DIN EN 10025-A1:1994 [33] und deren Nachfolgenormen DIN EN 10025-1:2005-02 [34] und DIN EN 10025-2:2004 [35] wird hierzu keinerlei Aussage mehr gemacht.

Vorgenannte Grenzwerte geben einen Anhalt dafür, ob vorgefundene Stähle reparaturgeschweißt werden können. Aus den vorgefundenen Grenzwerten lassen sich Ergebnisse zur **Schweißeignung** ablesen, weiterhin können hieraus auch Erkenntnisse für die Wahl eines Schweiß-Zusatzwerkstoffes abgeleitet werden. BLUM [36, S. 25] stellt fest, dass rückgetrocknete, basisch umhüllte Elektroden



Kohlenstoff C	Silizium Si	Phosphor P	Schwefel S	Stickstoff N
< 2,10	–	< 0,065	< 0,065	< 0,010

**Tabelle 3.1:** DIN 17100 – Schweißeignung: zulässige Konzentration in Masse-% ausgewählter Begleitelemente nach der Stückanalyse [31]

die Eigenschaft haben, aus dem aufgeschmolzenen Grundwerkstoff die Elemente Phosphor und Schwefel in der Schlacke zu binden.

PASTERNAK [37, S. 10] stellt die in Tabelle 3.2 wiedergegebene Übersicht der üblicherweise verwendeten Werkstoffe zusammen.<sup>1</sup> Die Einträge werden um die aktuellere Angaben aus älterer Normung ergänzt (Tabelle 3.3, S. 24).

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde der aktuelle Stand der Normung DIN EN 10025-2: 2004 [38] angefügt (Tabelle 3.4, S. 24).

Historische (Profil-)Stähle nach der Herstellung	Legierungbestandteile in Masse-%					
	C	Si	Mn	P	S	N
Puddelstahl im Mittel	0,025	0,147	0,213	0,396	0,061	0,009
Flussstahl im Mittel	0,070	0,020	0,471	0,043	0,042	0,010
Flussstahl Bessemer-Verfahren	0,094	0,101	0,491	0,047	0,047	0,014
Flussstahl Thomas-Verfahren	0,048	0,009	0,462	0,051	0,044	0,014
Flussstahl S/M-Verfahren	0,090	0,008	0,477	0,035	0,038	0,005

**Tabelle 3.2:** Übersicht über die chemische Zusammensetzung von Altstahl nach der Stückanalyse nach [37]

Die Schweißeignung war in der Vergangenheit bei der Herstellung von Altstählen jedoch kein wesentliches Herstellungskriterium. Teilweise wurde die Stähle weit vor dem ersten anwendbaren Schweißverfahren vergossen und gewalzt. Da die Altstähle und ihre Herstellungsverfahren jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die Schweißeignung haben, werden sie nachfolgend kurz beschrieben.

<sup>1</sup> S/M-Verfahren als übliche Abkürzung für das Siemens-Martin-Verfahren.

Unlegierter Baustahl S235 nach der Stückanalyse (DIN EN 10025:1990)	Legierungbestandteile in Masse-%					
	C	Si	Mn	P	S	N
S235JRG2 – $t \leq 40$ mm	0,190	–	1,500	0,055	0,055	0,011
S235JRG2 – $t > 40$ mm	0,230	–	1,500	0,055	0,055	0,011

**Tabelle 3.3:** Übersicht über die chemische Zusammensetzung von Altstahl nach der Stückanalyse nach [36]

Heutiger unlegierter Baustahl S235 nach der Stückanalyse (DIN EN 10025-2:2004)	Legierungbestandteile in Masse-%					
	C	Si	Mn	P	S	N
S235JR – $t \leq 16$ mm	0,190	–	1,500	0,045	0,045	0,014
S235JR – $16 \text{ mm} < t \leq 40$ mm	0,190	–	1,500	0,045	0,045	0,014
S235JR – $t > 40$ mm	0,230	–	1,500	0,045	0,045	0,014

**Tabelle 3.4:** Übersicht über die chemische Zusammensetzung von Altstahl nach der Stückanalyse nach [38]

Hieraus können sich Schlussfolgerungen zur Sicherheit der Bewertung der Schweißeignung ableiten lassen.

## 3.2 Puddeleisen

### 3.2.1 Herstellung

„Ueber die Streifen im Puddeleisen. Zur Nachweisung, daß das Puddeleisen in seiner Masse vertheilt Schlacke enthält, hat Chatelier (Comptes rendus, 1876 t. 82 p. 1057) ein Stück streifiges Eisen im Chlorstrom erhitzt und so das Eisen verflüchtigt. Es blieb eine weißgrüne leichte Masse von der Form des Eisenstückes

zurück, welche aus fein vertheilter Schlacke bestand. Holzkohleneisen enthielt 0,7 Proc. Schlacke, belgisches Eisen 1,3 Proc. Die Schlacken bilden lange, der Richtung, in welcher das Eisen gewalzt war, parallele Reihen.“

Der zitierte Textfund [39] von 1876 beschreibt das Kernproblem des Puddeleisens. Es enthält Schlackezeilen, die herstellungsbedingt sind.

Das Puddelverfahren wird 1784 durch den Engländer Cort entwickelt und 1824 erstmals durch Rémy auch in Deutschland angewendet. Cort stellt fest, dass Luftsauerstoff, der in den Verbrennungsgasen mitgeführt wird und über den Schmelztiegel streicht, bei Kontakt mit der Schmelze im Herd zu einer oberflächlichen Verschlackung des Roheisens führt. Dieses Verfahren wird als **Herdfrischverfahren** bezeichnet. Die Zufuhr von Sauerstoff aus der Atemluft – das Frischen – erfolgt oberflächlich an einem Herd (siehe Abbildung 3.2, S. 26).

Dabei handelt es sich um das Verbrennen von Kohlenstoff und Eisenbegleitern und das Absetzen der Verbrennungsprodukte als Schlacke auf dem Roheisen. Somit wird der Kohlenstoffgehalt oberflächennah reduziert.

Darüber hinaus sorgt der mit Quarzsand ( $\text{SiO}_2$ ) bedeckte Herdboden für ausreichend vorhandenen Sauerstoff, der den Kohlenstoff im Roheisen oxidiert.

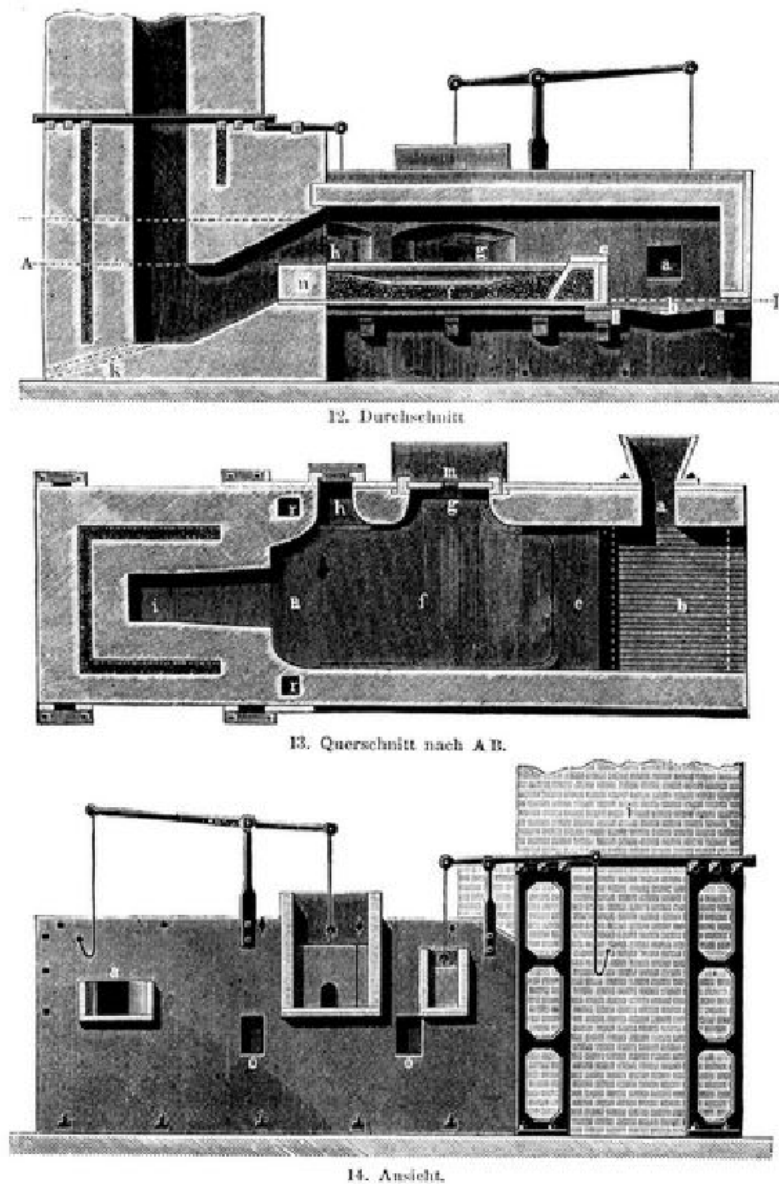
Der wesentliche Vorteil des Puddelofens ist, dass der fossile Brennstoff (Kohle, Koks oder Holzkohle) nicht mit dem Eisenerz in Kontakt kommt. Somit sind die Kohlenstoffgehalte für die damalige Zeit sehr niedrig.

Allerdings bewirkt die zunehmende Reinheit des Eisens einen Anstieg der Solidustemperatur im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (siehe hierzu Abbildung 3.3, S. 27).

Als Reaktion darauf reicht die Flammentemperatur des Feuers zur Beheizung des Ofens nicht mehr aus. Das immer kohlenstoffärmere Material droht zu erstarren. Der Materialzustand wird in zeitgenössischen Beschreibungen als „teigig“ bezeichnet.

Damit auch das Innere des langsam erstarrenden Eisenklumpens (Luppe) von Kohlenstoff befreit werden kann, muss dieser im Ofen „umgerührt“ werden. Im Englischen wird umrühren mit „to puddle“ bezeichnet, daher stammt der Name des Verfahrens (siehe Abbildung 3.4, S. 28).

Im Anschluss wird durch Hämmern oder unter Verwendung von Schmiedepressen versucht, die noch flüssige Schlacke aus dem Gefüge herauszupressen und



**Abbildung 3.2:** Puddelofen: Das Eisen wurde im Herd „f“ aufgeschmolzen, auf dem Rost „b“ wurde befeuert, die Feuerbrücke „e“ verhinderte den direkten Kontakt zwischen Koks und Eisen (entnommen aus [40])

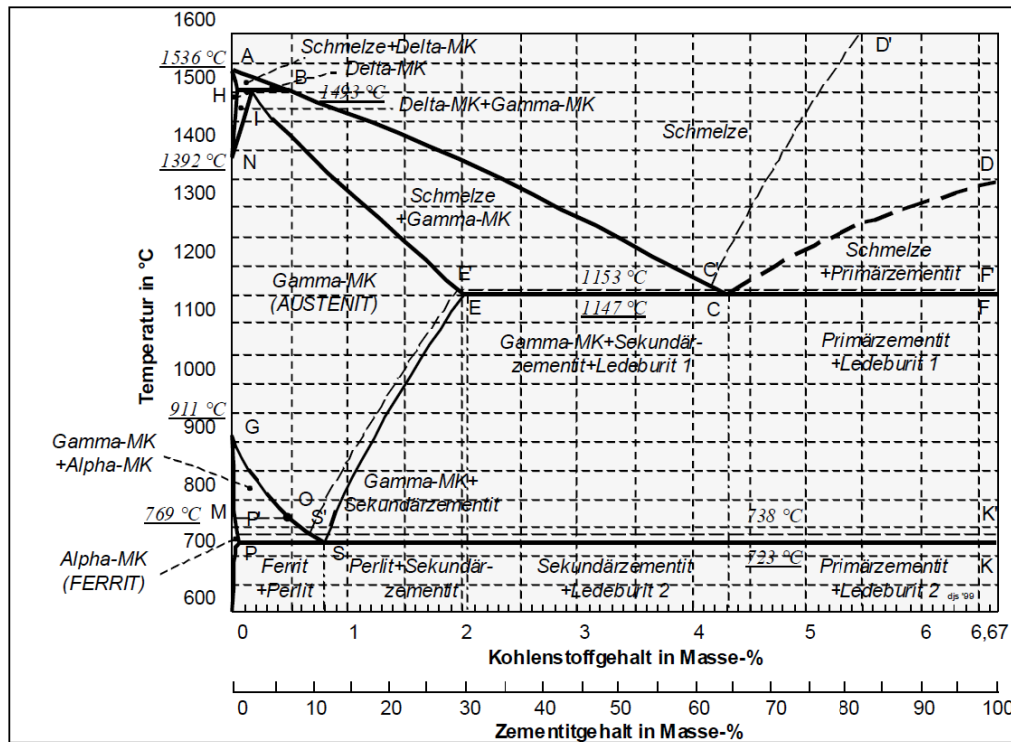


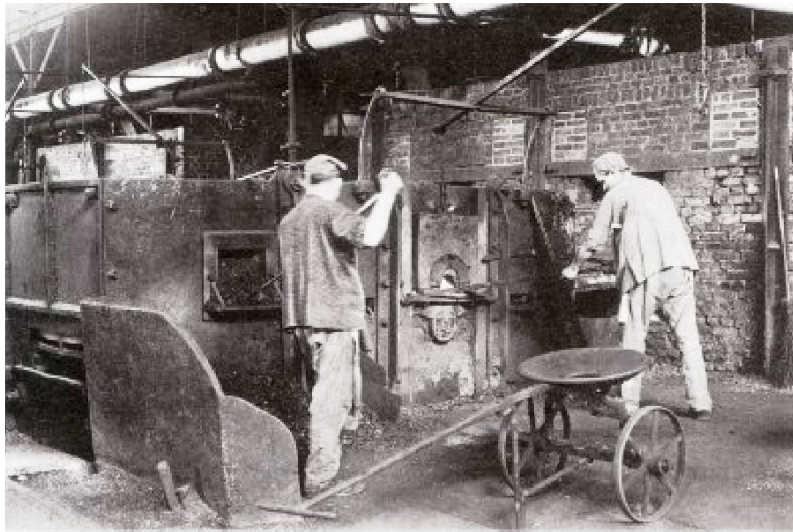
Abbildung 3.3: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (entnommen aus [41])

so das Material zu reinigen und zusammenzuschweißen (siehe Abbildung 3.5, S. 28). Das gelingt jedoch nur teilweise und es bleiben Schlackezeilen zurück.

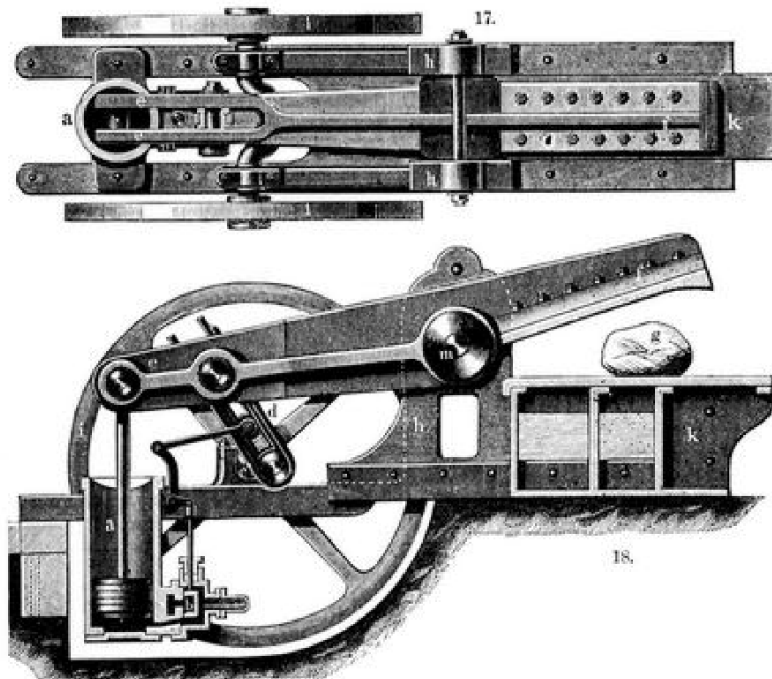
Der Versuch des „Zusammenschweißens“ trägt diesem Werkstoff den Namen Schweißisen, teilweise auch Schweißstahl, ein. Die sprachlichen Unterscheidungen der damaligen Zeit zwischen „Eisen“ und „Stahl“ werden noch erläutert (siehe hierzu Abschnitt 3.11 auf S. 59).

Der Anteil des Puddeleisens an der Gesamtproduktion in Deutschland beträgt im Jahre 1889 noch 54 %, 1890 noch 48 % und im Jahre 1913 nur noch rund 1,3 % [2, S. 16].

Die Verarbeitung von Puddeleisen endet demnach in Deutschland gegen Ende des 19. Jahrhunderts, etwa gegen 1905. Andere Stahlerzeugungsverfahren erzeugen größere Mengen eines schmelzflüssigen Endproduktes.



**Abbildung 3.4:** Puddler bei der Arbeit (entnommen aus [42])



**Abbildung 3.5:** Ein Luppenquetscher, ein mechanischer Schmiedehammer zum Zusammenquetschen respektive Zusammenschweißen der Luppe „g“ [40]

### 3.2.2 Metallurgie

Das Puddeleisen ist durch einen relativ geringen Anteil an Kohlenstoff gekennzeichnet. Er beträgt nach REICHE [43] im Mittel nur rund 0,025 %. Damit ist das Puddeleisen mit heutigen Baustählen vergleichbar, würde dieser Werkstoff nicht eine große Streuung aufweisen.

Die maximalen Werte betragen 0,091 %, die minimalen 0,001 %. Daraus lässt sich klar ableiten, dass es sich um einen Werkstoff handelt, der ohne definierte metallurgische Zusammensetzung hergestellt wurde – jede Charge ist also anders. Die mittleren Anteile an Phosphor, Schwefel und Stickstoff überschreiten jedoch zum Beispiel die in [31] angegebenen Grenzwerte.

So liegt der Anteil von Phosphor in den Grenzen von 0,650 % bis 0,179 %, im Mittel 0,396 %. Die Werte für Schwefel reichen von 0,135 % bis zu 0,023 %, im Mittel sind es 0,061 %. Bei Stickstoff liegen die Messwerte zwischen 0,026 % und 0,001 %, der Mittelwert beläuft sich auf 0,009 %.

Der Siliziumanteil rangiert in den Grenzen von 2,830 % und 0,120 %. Sein Mittelwert liegt bei 0,147 %. Die stark schwankenden Anteile an Silizium lassen sich dadurch erklären, dass der Herdboden händisch mit Quarzsand ( $\text{SiO}_2$ ) abgestreut worden ist. Diese Abstreuerung war natürlich der Fertigkeit des Streuenden überlassen, daher konnte die Werkstoffqualität stark schwanken.

Die vorliegenden Erkenntnisse beziehen sich auf eine Stichprobenanzahl von 102 untersuchten Proben. Die Angaben sind in Gewichtsprozent.

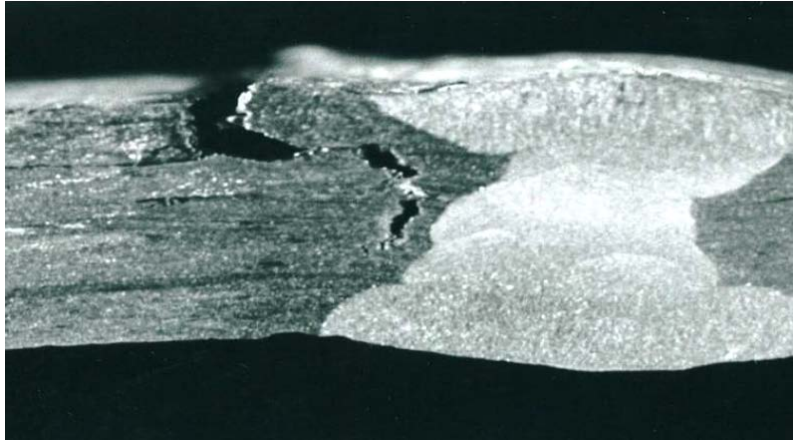
Aufgrund der im Puddelstahl stets vorliegenden Schlackeneinschlüsse gilt dieser Werkstoff als relativ korrosionsbeständig und ermüdungssicher.

Die chemische Analyse von Puddeleisen kann nur mithilfe der Nassanalyse verlässlich durchgeführt werden. Eine Funkenerosionsuntersuchung kann durch die vielfältigen Schlackeneinschlüsse zu verfälschten Ergebnissen führen.

### 3.2.3 Schweißeignung

Das Verfahren erzeugt einen Stahl mit einem hohen Anteil an Schlackezeilen, die in Walzrichtung verlaufen. Das Material ist geprägt von Inhomogenitäten und muss als **nicht schweißgeeignet** bezeichnet werden.

Zudem tritt durch die Schlackezeilen eine Anisotropie auf – das Material weist in Längsrichtung deutlich andere Materialeigenschaften als in Querrichtung



**Abbildung 3.6:** Aufreißen des Probestückes unmittelbar nach der Schweißung direkt neben der Schweißnaht [44], Blick von der Seite

auf. Durch die Schlackezeilen neigt es unmittelbar nach einer Schweißung zum Warmbruch.

Die vorgenannten, produktionsbedingten zeiligen Schlackeneinschlüsse im Puddeleisen und der hohe Anteil an Schwefel und Phosphor führen zu einem Aufreißen des geschweißten Werkstückes in der Wärmeeinflusszone (WEZ) unmittelbar nach der Schweißung (siehe hierzu die Abbildungen 3.6, S. 30 und 3.7, S.31).

KUSCHER [44] hat hierzu geforscht und diesen Werkstoff als **nicht schweißgeeignet** determiniert. Obwohl nahezu rein ferritisches Gefüge vorliegt, bedingen die großvolumigen Schlacken im Werkstoff ein Versagen in der WEZ.

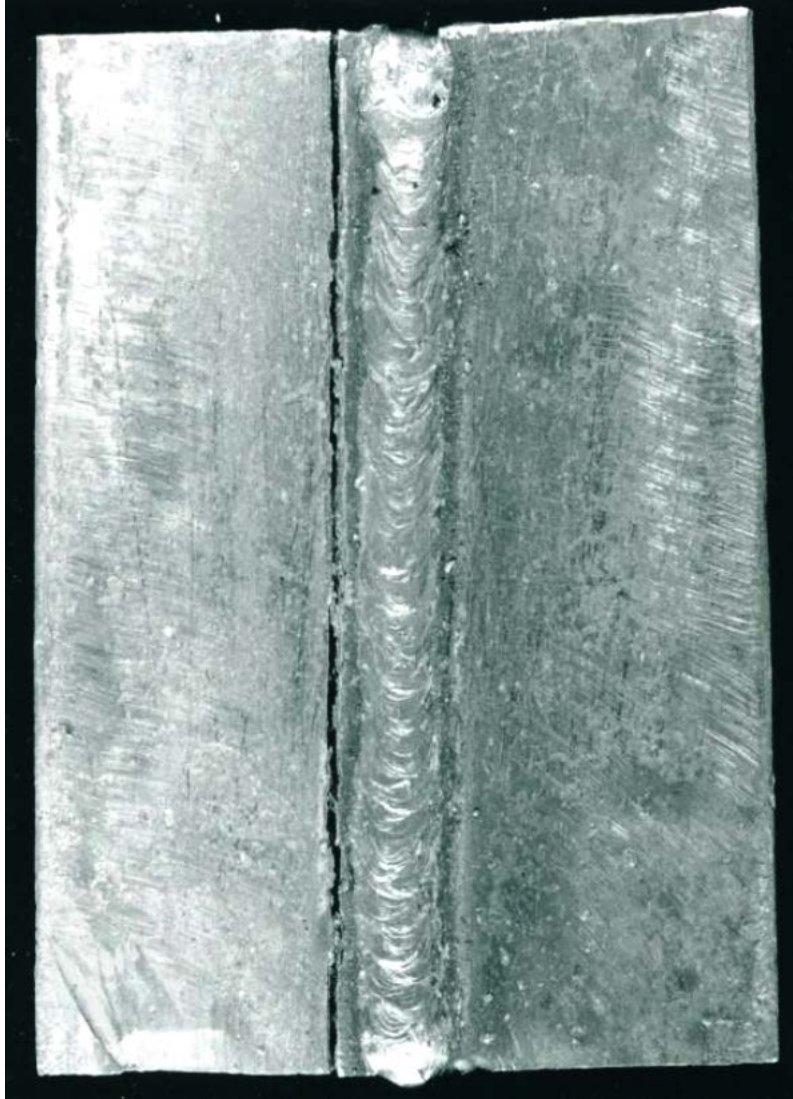
## 3.3 Tiegelstahl

### 3.3.1 Herstellung

Der Tiegelofen ist älter als der Puddelofen. Er wird bereits um 1740 in England durch Huntsman entwickelt. Der Uhrmacher versucht so zu verhindern, dass durch minderwertigen Werkstoff Uhrfedern und Pendel brechen. In feuerfesten Tiegeln wird Gusseisen erneut eingeschmolzen und gewinnt so an Reinheit und an Dauerfestigkeit (siehe Abbildung 3.8, S. 32).

Tiegelstahl im Sinne dieser Arbeit ist jedoch als Weiterentwicklung des Puddeleisens zu sehen. Das Puddeleisen, behaftet mit zeiligen Einschlüssen von Schlacke,





**Abbildung 3.7:** Aufreißen des Probestückes unmittelbar nach der Schweißung direkt neben der Schweißnaht [44], Blick von oben

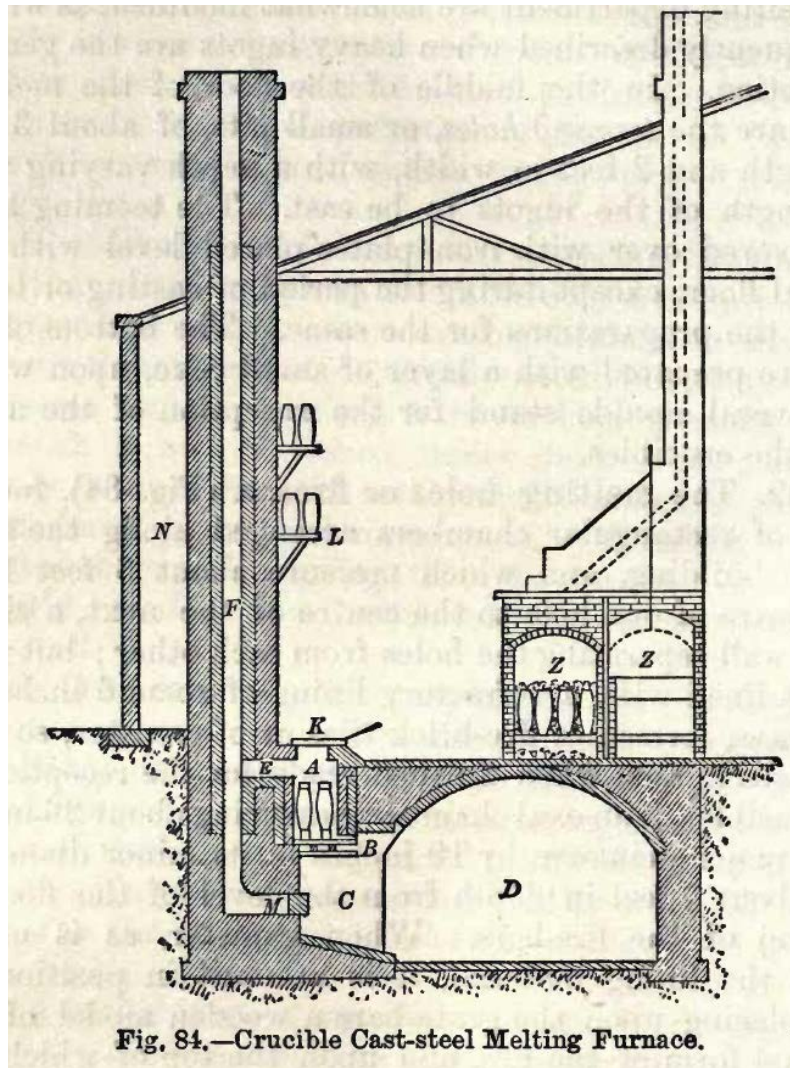


Fig. 84.—Crucible Cast-steel Melting Furnace.

**Abbildung 3.8:** Tiegelofen: Tiegel (A) im mit Brennstoff gefüllten Ofenschacht, abgedeckt durch Deckel (K); durch die Roste (B) gelangt Frischluft aus dem Wartungsgang (D) durch den Aschefall (C) in den Ofen, dann durch Fuchs (E) und Esse (F) ins Freie (Abbildung aus [45])

wird in feuerfesten Tiegeln erneut ein- bzw. umgeschmolzen (**Umschmelzverfahren**).

Die Tiegel verhindern dabei den Kontakt zwischen Koks und Schmelze, sodass ein Aufkohlen, der Zuwachs von Kohlenstoff in der Schmelze, ausgeschlossen ist. Im Rahmen des erneuten Einschmelzens werden die Schlacken ausgetrieben und der Werkstoff gewinnt an Reinheit.

Weiterhin können gezielt metallurgische Eingriffe vorgenommen werden. So werden beispielsweise Legierungselemente wie Nickel hinzugegeben (**Sekundärmetallurgie**).

Die Firma Krupp bringt 1823 ein Tiegelstahlverfahren bis zur Marktreife. Die Kosten dieses Verfahrens sind allerdings so hoch, dass der erschmolzene Stahl nahezu ausschließlich zu Eisenbahnkomponenten verarbeitet wird [46]. Daher stammen die drei nahtlosen Radreifen im Firmensymbol der Firma Krupp.

Das Nachbearbeiten löst die noch im Stahl befindlichen Schlacken und Oxide aus und das Endprodukt zeigt sich als relativ reiner Stahl.

Durch das Nachbearbeiten ist dieser Stahl jedoch zu teuer, um in Massen eingesetzt zu werden [1]. Sein Einsatz ist Spezialkomponenten vorbehalten, da Legierungselemente gezielt zur Erreichung mechanisch-technologischer Eigenschaften zugesetzt werden [47, S. 757]. Tiegelstähle, auch Huntsman-Stähle genannt, spielen daher im Bauwesen keine Rolle.

Das Verfahren des Umschmelzens von Stahlerzeugnissen in Herden wird allerdings heute noch praktiziert. Hier wird gezielt Sekundärmetallurgie betrieben, die dem Stahl durch Zugabe der entsprechenden Legierungselemente die gewünschten Eigenschaften verleiht. Es wird nur anders geheizt, Koks wird nicht mehr verwendet.

## 3.4 Bessemerstahl

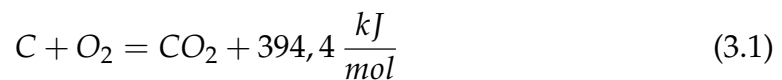
### 3.4.1 Herstellung

Dieses Herstellungsverfahren wird im Jahre 1855 durch Bessemer, wie Cort Engländer, entwickelt. Krupp führt das Verfahren 1862 in Deutschland ein [37, S. 9].

„Indess ist die Temperatur so hoch, dass der chemisch beigemischte Kohlenstoff sich jetzt vom Eisen zu scheiden beginnt, wie dies sogleich durch die bedeutend vergrößerte Flamme, welche aus dem Ofenschlunde emporschlägt, angezeigt wird“ [48, S. 241].

BESSEMER versucht, durch Öffnungen im Boden Luft (Druckluft) in den beheizten Ofen einzublasen. Das hat zur Folge, dass der im warmen Roheisen enthaltene Kohlenstoff mit dem Sauerstoff in der eingeblasenen Luft chemisch reagiert.

Die Reaktion erfolgt exotherm, setzt also zusätzliche Energie in Form von Wärme frei. Die freigesetzte Wärmemenge ist so groß, dass die Temperatur im Ofen stark ansteigt und die Werte, die ein Puddelofen erreichen kann, bei Weitem übersteigt. Es läuft folgende **exotherme Reaktion** ab:

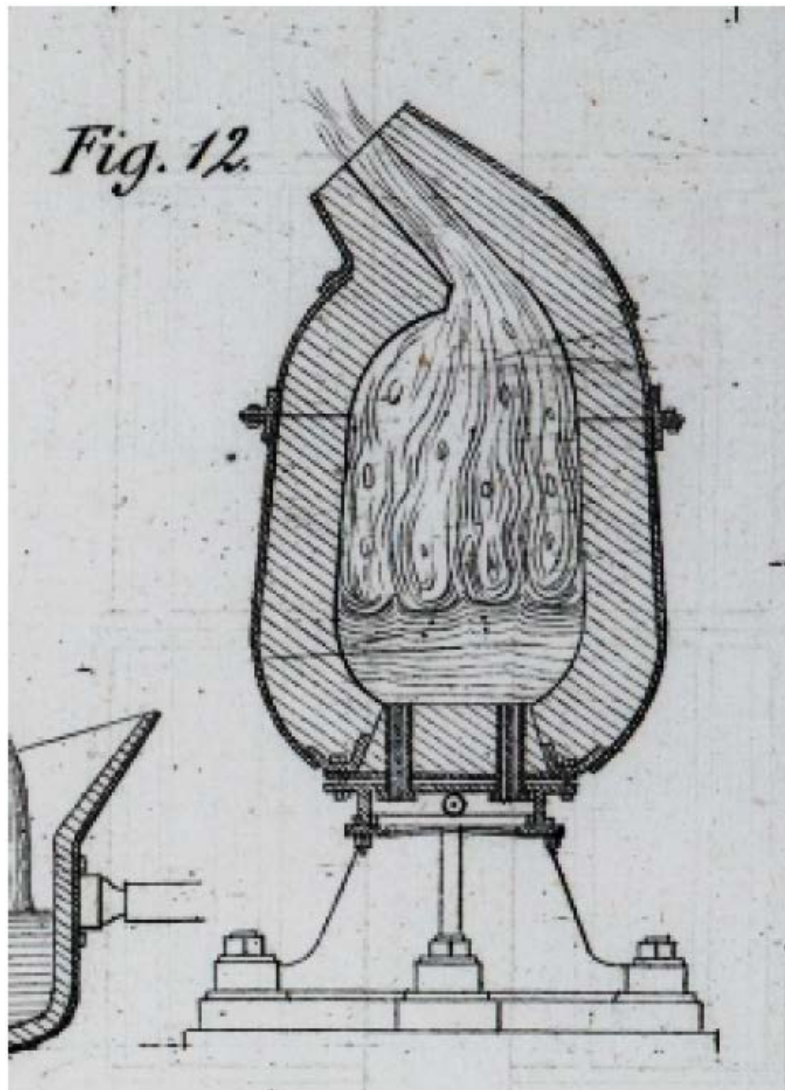


Dadurch wird das eingefüllte Roheisen dünnflüssig, nicht nur breiig wie beim Puddelofen. Die Bezeichnung lautet daher Flusseisen oder Flussstahl (siehe hierzu Abschnitt 3.11 auf S. 59). Die starke Blasenbildung bei der Verbrennung des Kohlenstoffes (Kochen) sorgt für eine fortwährende Umwälzung und Durchmischung der Schmelze.

Zudem ist die Temperatur so hoch, dass auf eine zusätzliche Beheizung, wie beim Puddelofen notwendig, gänzlich verzichtet werden kann. Das Verbrennen des Kohlenstoffes im Roheisen liefert ausreichend Energie zur Beheizung des Ofens, denn dieser Ofen geht niemals aus.

Das Verfahren nach Bessemer ist also ein Bodenblasverfahren zur Stahlerzeugung, bei dem Luft – in der Fachsprache der Stahlerzeugung Wind genannt – durch das Roheisen geblasen wird, ein **Windfrischverfahren** der Stahlerzeugung. Dieses Verfahren liefert für die damalige Zeit große Mengen an schmelzflüssigem Werkstoff, der bis zum Ende des Raffinationsprozesses flüssig bleibt.

Der Windfrischprozess in der Bessemerbirne dauert nur etwa 20 bis 25 Minuten [45, S. 491]. In dieser Zeit werden zwischen 1.000 kg und 8.000 kg Stahl erzeugt. Das Puddelverfahren nach Cort dauert rund 24 Stunden bei deutlich kleinerer Ausbringung an Werkstoff. PASTERNAK [37, S. 9] spricht hier von 4,5 Tonnen am Tag.



**Abbildung 3.9:** Eine Bessemerbirne (Konverter) (Abbildung entnommen aus [49])

Die Bessemerbirne (siehe Abbildung 3.9, S. 35) – auch Konverter genannt – wird mit saurem, feuerfestem Material ausgemauert (zugestellt). Die Zustellung erfolgt in der Regel aus saurer Schamotte und feuerfestem Ton. Die Schamotte wird aus kieselsaurem Quarzit hergestellt.

Aus diesem Grund muss das zugeführte Roheisen niedrige Gehalte an Phosphor und Schwefel aufweisen, da diese Elemente im Bessemerkönverter nicht verschlackt werden können. Phosphor und Schwefel bilden mit der sauren Ausmauerung (Zustellung) Säuren, die nicht aus der Schmelze entweichen.

„Ein Phosphorgehalt des Roheisens ist bei der gewöhnlich angewandten, viel Kieselsäure enthaltenden Ausfütterung der Bessemerbirne (saurer Prozeß) sehr schädlich, weil die Phosphorsäure aus dem entstehenden phosphorsauren Eisenoxydul<sup>2</sup> durch die Kieselsäure der sauren Schlacke ausgeschieden und darauf reduziert wird und deswegen Phosphor wiederum ins E. geht. Der Phosphorgehalt des Roheisens darf aus diesem Grund beim sauren Prozeß höchstens 0,1 Proz. betragen. Wenn man bedenkt, daß mehr als 97 Proz. aller in Deutschland geförderten Eisenerze so phosphorhaltig sind, daß das daraus erzeugte Roheisen zum gewöhnlichen Bessemer-Prozeß nicht zu verwerten ist und man deshalb früher auf die Einfuhr ausländischer phosphorfreier Erze angewiesen war, so ergibt sich daraus, von welcher hohen Bedeutung es ist, daß der Bessemer-Prozeß im J. 1879 von Thomas und Gilchrist so weit ausgebildet wurde, daß er nahezu allgemein anwendbar wurde und namentlich auch bei Verarbeitung phosphorhaltigen Roheisens gutes schmiedbares E. lieferte“ [40].

Somit sind die zu verwendenden Rohstoffe stark eingeschränkt, es müssen teure Erze aus dem Ausland eingeführt werden. Die Obergrenze des Phosphoranteils liegt bei rund 0,1 % [37, S. 9].

Die Erzeugung von Bessemerstahl nimmt durch die konkurrierenden Verfahren etwa ab 1880 stark ab und wird ab 1920 praktisch bedeutungslos. Um 1940 gibt es – vermutlich bedingt durch den Stahlbedarf der Rüstungsindustrie des Zweiten Weltkrieges – einen erneuten Anstieg. SCHÖTSCHER [50, S. 24] beschreibt, dass 1960 in der Bundesrepublik noch 11 Bessemerkönverter vorhanden sind.

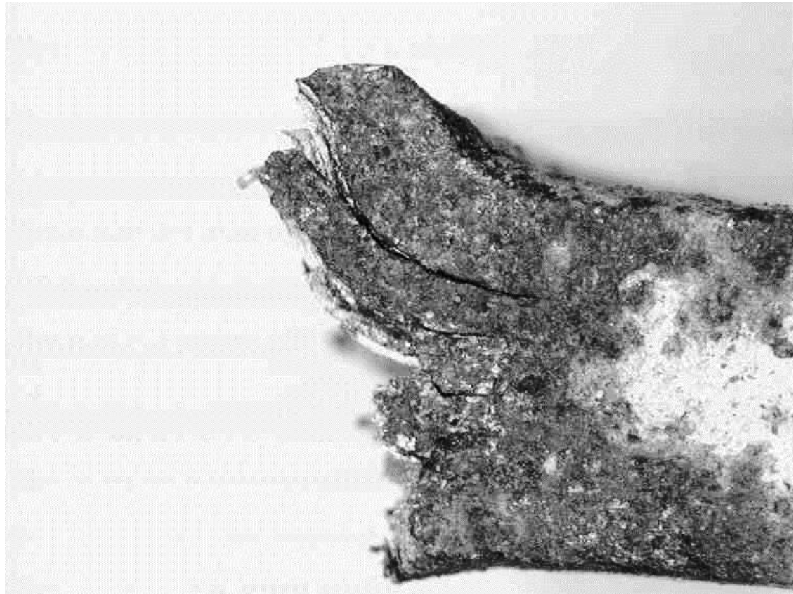
KÜNTSCHER [51, S. 20] weiß zu berichten, dass 1962 in der Bundesrepublik Deutschland noch 0,2 % und in der Deutschen Demokratischen Republik noch 1,9 % der Stahlerzeugung auf Bessemerstähle entfallen.

Diese Aussagen werden vom BUNDESVERBAND STAHL [52] gestützt, der für 1962 eine Produktion von rund 52.000 Tonnen Bessemerstahl angibt [53].

---

<sup>2</sup> Eisenoxydul ist eine alte Bezeichnung für Eisenoxid.





**Abbildung 3.10:** Durch Sprödbbruch zerstörte Strebe aus einer Altstahlkonstruktion, Blick von der Seite [54]

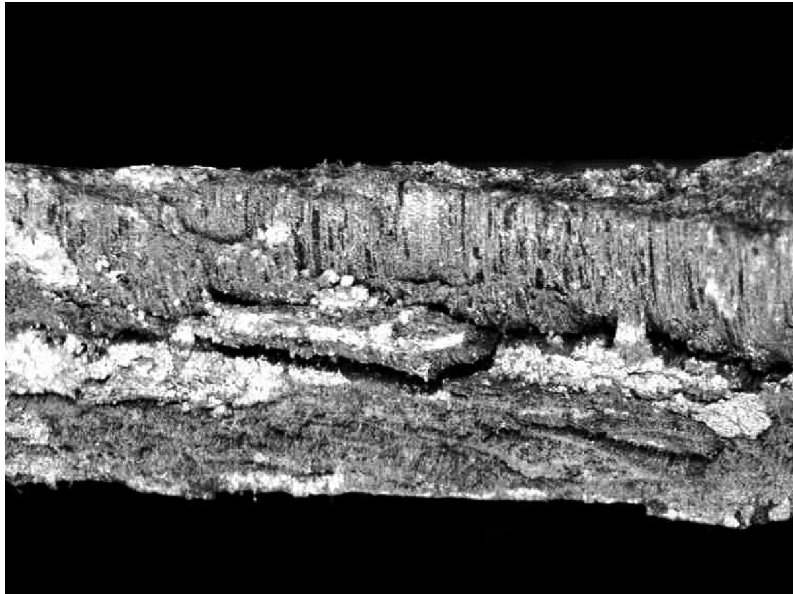
Bedingt durch die phosphatarmen Erze, beläuft sich in Spanien der Anteil an der Stahlproduktion im gleichen Jahr noch auf 13,9 %, in Norwegen gar auf 44,8 %.

### 3.4.2 Metallurgie

Durch das Einblasen von Luft in den Konverter wird der Schmelze ein hoher Anteil an Stickstoff zugeführt. Somit sind die Anteile an Stickstoff erwartungsgemäß hoch und belaufen sich im Mittel auf 0,014 %.

Als weitere Legierungselemente lassen sich im Mittel Kohlenstoff zu 0,094 %, Silizium zu 0,101 %, Mangan zu 0,491 %, Phosphor zu 0,047 % und Schwefel ebenfalls zu 0,047 % identifizieren [37, S. 10]. Der mittlere Anteil an Stickstoff überschreitet den zum Beispiel in [31] angegebenen Grenzwert um 40 %.

Diese hohen Anteile an Stickstoff führen zu einer zeitabhängigen Ausscheidung von Eisennitriden, der Stahl „altert“. Durch das „Altern“ des Werkstoffs kommt es zu einer Versprödung des Stahls, es treten Veränderungen des Dehnungs- und Zähigkeitsverhaltens ein (siehe hierzu die Abbildungen 3.10, S. 37 und 3.11, S. 38).



**Abbildung 3.11:** Durch Sprödbbruch zerstörte Strebe aus einer Altstahlkonstruktion, Ansicht auf die Bruchfläche [54]

#### 3.4.3 Schweißeignung

Der auf diese Art hergestellte Stahl weist einen hohen Anteil an Stickstoff auf, dessen Anteil an der Atemluft rund 78 % beträgt. Somit wurde bei jedem Frischen mehr Stickstoff (78 %) als Sauerstoff (21 %) in den Stahl geblasen.

Das schränkt aufgrund der „Alterung“ die Verwendung von Bessemerstählen zum Schweißen stark ein.

Der Stickstoff führt zu einer Abnahme der Kaltverformbarkeit, da sich der diffundierende Stickstoff über die Jahre des Betriebs an den Versetzungslinien des Kornes platziert und diese Gleitebenen somit blockiert. Wenn anschließend eine Kaltverformung erfolgt – Anprall eines Fahrzeuges an eine Brückenstütze, eventuell im Winter – kann es zu einem Sprödbbruch kommen.

„Bei höheren Temperaturen (200 °C bis 300 °C) können die Stickstoffatome schon während der Kaltverformung zu den Versetzungen diffundieren“ [55, S. 155].

Im Schweißprozess wird der Stahl erschmolzen und kühlt dann wieder auf Raumtemperatur ab. Dabei durchläuft er ein kritisches Temperaturintervall, nämlich das von 200 °C bis 300 °C. Sind dann Zwänge vorhanden, hohe Eigenspannungen zum Beispiel, kann es zum Sprödbbruch kommen.



Diese Stähle neigen also zum Spröbruch, auch im Bereich der Wärmeeinflusszone einer Schweißung. Somit besteht die Gefahr, bei einer Reparaturschweißung einen Spröbruch zu provozieren.

Stähle, die nach Bessemer hergestellt worden sind, sollten als **nicht schweißgeeignet** bezeichnet werden oder aber als **nicht ohne vorherige Untersuchung schweißgeeignet** [44]. Hier ist von wesentlichem Einfluss, wie dieser Stahl vergossen wurde.

Die Schweißeignung hängt im Wesentlichen von drei Faktoren ab, die im Anschluss an KUSCHER [44] in Tabelle 3.5 (S. 39) dargestellt sind.

Einflussgröße	Bemerkung
Seigerungen	Art und Größe der Seigerungszone, abhängig von der Art der Vergießung
Chemie	chemische Zusammensetzung des Werkstoffes, Gehalte an C, Si, Al, P, S, N
Reinheitsgrad	Art und Größe der Schlackenanteile im Werkstoff

**Tabelle 3.5:** Einflussgrößen der Schweißeignung von Bessemerstählen nach KUSCHER [44]

Die Seigerungszone des Profils ist häufig reich an Mangansulfiden (MnS) in einem Gefüge aus voreutektoidem Ferrit. Sie lassen ein Schweißen in der Regel nicht zu, da die hohen Gehalte an Schwefel Heißrissigkeit des Werkstoffes verursachen.

Die Randzone hingegen ist verhältnismäßig rein und lässt sich nachweislich (LÜDDECKE [1]) gut schweißen.

Dies gilt auch für Stähle, die nach Thomas erschmolzen wurden. Auch sie weisen einen hohen Stickstoffgehalt auf.

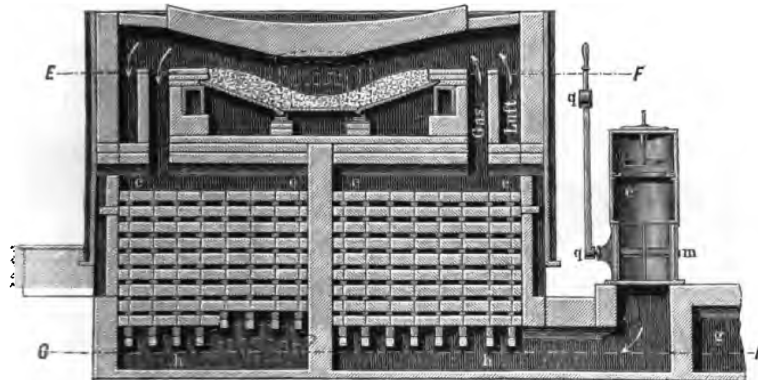


Abbildung 3.12: Siemens-Martin-Ofen im Schnitt nach LEDEBUR [56, S. 259]

## 3.5 Siemens-Martin-Stahl

### 3.5.1 Herstellung

Dieses Verfahren der Stahlerzeugung wird von den deutschen Brüdern Siemens entwickelt und von dem Franzosen Martin weiterentwickelt. Im Jahre 1856 entwickelt Friedrich Siemens einen gasbefeuerter Herdofen (Regenerativofen). Darauf meldet er im gleichen Jahr in England ein Patent mit dem Titel „*Improved Arrangement of Furnaces, which improvements are applicable in all cases where great heat is required*“ an. Das Prinzip des Ofens ist in Abbildung 3.12, S. 40, dargestellt.

Anfängliche Schwierigkeiten mit der feuerfesten Auskleidung des Herdes führen dazu, dass dieser Herdtyp zunächst nur zum Erschmelzen von Glas verwendet werden kann. Nach Modifikation durch Martin, einen französischen Hüttenwerksbesitzer, gelingt es, damit auch Stahl zu erschmelzen.

Ab 1864 wird mit diesem Verfahren erfolgreich bei hohen Temperaturen Stahl erzeugt. Das erfolgt wie beim Bessemerkonverter unter Einsatz von Roheisen, aber auch, und das ist neu, unter Zusatz von Eisenschrott. Bereits 1868 wird dieses Verfahren bei Böhler in Österreich angewendet. Ab 1869 kocht Krupp in Essen mit diesem Verfahren Stahl.

Bei diesem **Herdfrischverfahren** ist im Gegensatz zum Puddelverfahren, das auch ein Herdfrischverfahren ist, die Temperatur so hoch, dass der Stahl flüssig wird. Diese Art von Öfen ist in der Lage, Temperaturen von rund 1.800 °C zu erreichen.

Damit das gelingen kann, werden die Brenngase, die den Herd beheizen, durch die Abgase des Ofens vorgewärmt. Dazu dienen die unter dem Oberofen befindlichen Regenerativkammern. Durch sie wird das warme Abgas geleitet, durch dessen Energie sich die feuerfeste Ausmauerung der Kammern aufheizt.

Nach Umschalten der Lüftungskanäle strömt anschließend frisches Brenngas durch diese Regenerativkammern, erwärmt und entzündet sich und beheizt so den Herdofen.

Die Zugabe von Schrott und gemahlenem Kalk als Schlackenbildner führt zu einer desoxidierenden Wirkung im Schmelzbad. Zusätzlich dazu wirken die Flammgase desoxidierend, ähnlich wie die reduzierende Flamme beim Gas-schmelzschweißen.

Der vordergründige Nachteil, dass bei einer Charge von rund 10 Tonnen eine gegenüber dem Bessemerkonverter lange Verarbeitungszeit von rund acht Stunden besteht, wird durch die hohe Qualität des Stahles aufgehoben.

Darüber hinaus gelingt es alsbald, die chargierten Mengen anzuheben und teilweise bis auf 600 Tonnen zu steigern.

Im Jahr 1962 werden 46,2 % des erzeugten Stahles in der Bundesrepublik Deutschland im Siemens-Martin-Verfahren erzeugt. In der Deutschen Demokratischen Republik sind es bereits 72,2 % [51, S. 19].

Der letzte in Deutschland betriebene Siemens-Martin-Ofen wird 1989 in Brandenburg/Havel außer Betrieb genommen; in Teilen der Welt wird das Verfahren noch bis über den Jahrtausendwechsel angewendet.

#### 3.5.2 Metallurgie

Diese Stähle zeichnen sich durch ausgezeichnete mechanisch-technologische Werte aus. Ihr Vorteil ist, dass die Qualität des erschmolzenen Endproduktes nicht allein vom verwendeten Erz abhängig ist, sondern sich ganz gezielt durch die Zugabe von Schrott bestimmter Qualitäten, Schlackenbildnern und Legierungselementen steuern lässt.

Der in der Schmelze vorhandene Kohlenstoff wird durch die desoxidierende Wirkung der Zugabestoffe Schrott und Schlackenbildner sowie durch die Flammgase reduziert und beträgt rund 0,09 %.

Besonders von Vorteil ist der geringe Anteil an Stickstoff. KÜNTSCHER spricht von Gehalten von etwa 0,006 bis 0,008 % [51, S. 19]. Diese Angaben decken sich mit den bereits vorgestellten Werten aus Tabelle 3.2 auf Seite 23.

Aus diesem Grund unterliegen Siemens-Martin-Stähle keiner stickstoffinduzierten Alterung. Sie sind also unempfindlich gegen Abschreckalterung, zum Beispiel durch Schweißarbeiten, und gegen Reckalterung, zum Beispiel durch Kaltverformung. Weiterhin ist ein großes Plus dieser Stähle, dass sie kaum nichtmetallische Einschlüsse, Schlacken, aufweisen.

#### **3.5.3 Schweißeignung**

Der Werkstoff kann allerdings je nach Wahl des Vergießungsverfahrens hinsichtlich der Schweißeignung problematisch sein.

Wie bereits durch KUSCHER [44] (siehe hierzu Tabelle 3.5 auf Seite 39) erkannt, ist die Art der Vergießung hinsichtlich eventuell vorhandener restlicher Seigerungen wesentlich.

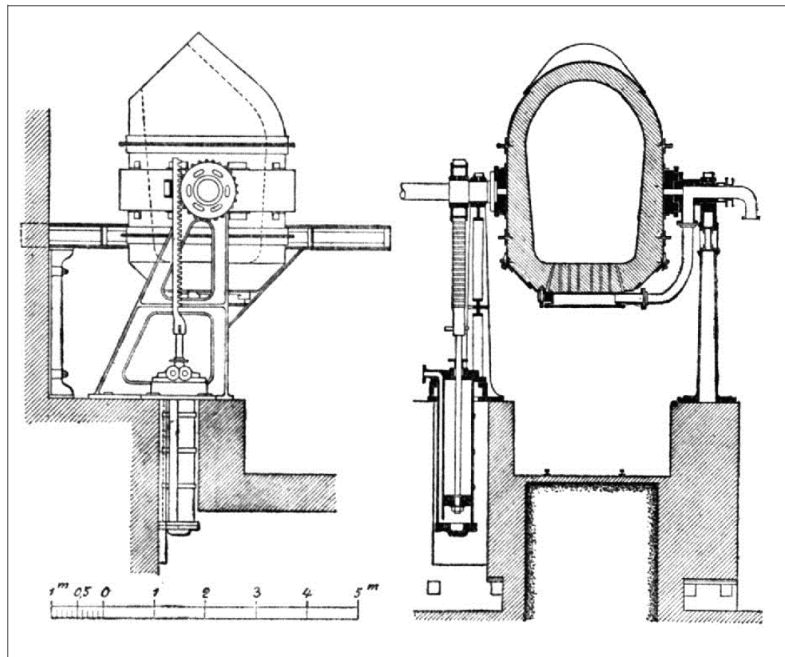
Diese lassen sich im Rahmen einer Probenentnahme und dem Anfertigen eines Baumann-Abdruckes sichtbar machen. Hierbei wird durch ein fotografisches Verfahren ein Abdruck eines Schlicfs angefertigt, dessen Bild die Verteilung von Schwefel im Werkstoff anzeigt. Das erfolgt in der Regel mit Fotopapier, das in verdünnter Schwefel- oder Salzsäure getränkt und auf die angeschliffene Prüffläche gepresst wird.

Die Säure reagiert mit den Sulfiden im Stahl zu Schwefelwasserstoff, der sich mit dem Silber des Fotopapiers zu Silbersulfid umsetzt. Dieses färbt das Fotopapier je nach Konzentration mehr oder weniger braun. Anschließend wird der Abdruck fixiert (siehe hierzu zum Beispiel die Abbildung 3.16, S. 51, dort das obere Bild).

### **3.6 Thomasstahl**

#### **3.6.1 Herstellung**

Dieses Herstellungsverfahren wird von den Briten Thomas und Gilchrist im Jahre 1878 vorgestellt und erreicht bereits 1879 Deutschland.



**Abbildung 3.13:** Thomaskonverter, Ansicht und Schnitt, zeitgenössische Darstellung nach [57]

Es stellt eine Abwandlung des Verfahrens nach Bessemer dar, bei der die Ausmauerung des Konverters mit basischem Material erfolgt. Dabei handelt es sich in der Regel um Dolomit, ein Kalkgestein. Weiterhin wird während des Stahlkochens Kalk in die Schmelze gegeben. Die Zugabe von Kalk verfolgt den Zweck, zusätzlich basisches Material zuzuführen, das den Phosphor im Erz abbundet.

Somit lassen sich vorhandene Bessemerkonverter mit einfachen Mitteln zu Thomaskonvertern umbauen – die Ausmauerung wird ersetzt und eine Kalkschütte wird ergänzt (siehe Abbildung 3.13, S. 43).

Die Grundzüge des Verfahrens, ein **Windfrischverfahren**, jedoch bleiben die gleichen. Es wird in einem Konverter durch Einblasen von Luft eine exotherme Reaktion induziert.

Auch das Thomasverfahren liefert ein schmelzflüssiges Endprodukt, durch das Luft mit immerhin 78 % Stickstoffanteil hindurchgeblasen wird.

Der große Vorteil an diesem Verfahren ist jedoch, dass die basische Ausmauerung (Zustellung) ein Verarbeiten von phosphatreichen Erzen möglich macht. Somit ist es vor allem im Saarland möglich, heimische phosphatreiche Erze zu Stahl zu verblasen.

Ein Nebenprodukt der Erzeugung im Thomaskonverter ist, dass die anfallende Schlacke beim Verblasen phosphatreicher Erze als Dünger genutzt werden kann.

Im Rahmen des Konverterprozesses bildet sich Phosphorpentoxid ( $P_2O_5$ ), das mit dem Dolomit ( $CaMg(CO_3)_2$ ) der Ausmauerung und der Schüttenzugabe schließlich als Schlacke oben auf der Schmelze schwimmt.

Die Schlacke wird nach dem Erstarren fein gemahlen und als Phosphatdünger zum Verkauf gebracht.

Im Jahr 1962 werden 40,6 % des erzeugten Stahles in der Bundesrepublik Deutschland im Thomasverfahren erzeugt. In der Deutschen Demokratischen Republik sind es dagegen nur 9,6 % [51, S. 20].

Um das Thomasverfahren konkurrenzfähig zu halten, wird es im Verlauf seiner Existenz modifiziert. Durch Einblasen von Sauerstoff und Luft, später dann durch Einblasen von Sauerstoff und Wasserdampf, auch als DSN-Verfahren<sup>3</sup> bezeichnet, gelingt es, stickstoffarme Stähle herzustellen. Diese verbesserten Konverterstähle VK<sub>1</sub> (Sauerstoff und Luft) und VK<sub>2</sub> (Sauerstoff und Wasserdampf) werden ab etwa 1946 hergestellt, können aber den Vormarsch des Siemens-Martin-Stahles nicht aufhalten.

Das Thomasverfahren wird in der Bundesrepublik Deutschland bis 1977 angewendet. Dann erlischt in Neuenkirchen der letzte Thomaskonverter.

#### 3.6.2 Metallurgie

Die Metallurgie der Thomasstähle zeigt keine grundsätzlich anderen Eigenschaften als die der Bessemerstähle auf. Die einzig wesentliche Abweichung ist der geringere Gehalt an Silizium und Kohlenstoff (vergleiche hierzu Tabelle 3.2, S. 23) [37, S. 10] [43] [58, S. 145].

Insgesamt lässt aber der Vergleich mit Tabelle 3.1 auf Seite 23 mit Ausnahme des Gehaltes an Stickstoff erwarten, dass in Grenzen eine Schweißeignung vorliegt. Das Ausschlusskriterium ist jedoch der zu hohe Anteil an Stickstoff.

Die im Jahr 2005 aufgekommene Diskussion um Thomasstahl, der bei den Masten von Hochspannungsleitungen verwendet wurde, weist auf die Problematik der Alterung hin [59].

---

<sup>3</sup> DSN leitet sich von Dampf-Sauerstoff-Neuenkirchen ab.

Über die Betriebsdauer erfolgt eine Stickstoffdiffusion entlang der Korngrenzen des Gefüges. Diese reduziert das plastische Verformungsvermögen des Stahls und generiert somit eine lokale Versprödung. Damit droht bei Zugbeanspruchung die Gefahr eines Sprödbruches [60].

Diese Zusammenhänge wurden von BAER [61, S. 39] zusammenfassend dargestellt. Hier sind besonderes Augenmerk auf die Abschreckalterung und die Reckalterung gelegt worden.

Unter Abschreckalterung wird die Ausscheidung von Kohlenstoff und vor allem Stickstoff bei rascher Abkühlung verstanden. Dabei lagern sich nicht gelöste Atome an den Versetzungen an und blockieren diese Gleitebenen im Werkstoff. Eine weitere plastische Verformung wird somit behindert. Diese Art der Alterung tritt beim Schweißen auf und betrifft „vorrangig weiche, unlegierte bzw. Baustähle“ [61, S. 39].

Unter Reckalterung hingegen wird die zeitabhängige Veränderung des Werkstoffs subsumiert, die aufgrund von Kaltverformungen entsteht. Bei diesem Vorgang, der Kaltverformung, werden künstlich erzeugte Versetzungen in das Metallgitter eingebracht. Daran lagern sich Kohlenstoff und Stickstoff an und blockieren diese Gleitebenen. Dort erhöht sich die Festigkeit des Baustoffes und die Plastizität sinkt ab.

Die in [59] dargestellten Schadensfälle an Freileitungsmasten rühren unter anderem von Bruchereignissen her, die im Bereich gestanzter Löcher für Verbindungsmittel entstanden sind. Dieser Sachverhalt wurde offenbar erst nach Errichtung der betroffenen Maste bekannt.

In der aktuellen Normung ist in DIN EN 1090-2 das Stanzen von Löchern nicht mehr zulässig, wenn die Materialdicke den Durchmesser des Verbindungsmittels übersteigt [62].

Diese Gefahr, die aus der Versprödung hervorgeht, besteht auch, wenn die Querschnitte in den Bereich der plastischen Rotation gelangen.

Die Bemessungsvorschriften des Eurocodes 3 (EC 3) verlangen, dass die verwendeten Baustähle eine Bruchdehnung von mindestens 15 % aufweisen [63]. Nur so können die Anforderungen der Bemessung an den Werkstoff sichergestellt werden. Ist die Bruchdehnung kleiner – weil der Werkstoff durch Alterung versprödet –, wird das Tragwerk vor Erreichen der Bemessungslast versagen.

Alle vorgenannten Überlegungen gelten für alle Stähle mit hohem Anteil an Stickstoff, also auch für Stähle, die nach Bessemer erblasen wurden.

### 3.6.3 Schweißeignung

Thomasstahl ist wie Bessemerstahl als **nicht schweißgeeignet** zu beurteilen. Abhängig von der Art der Vergießung sind die Randzonen relativ sauber und wären schweißgeeignet. Die inneren Bereiche der Profile sind jedoch zu Phosphor- und Schwefelseigerungen verunreinigt und neigen zu Heißrissigkeit.

Die durch den hohen Anteil an Stickstoff im Werkstoff vorhandene Neigung zur Alterung, einhergehend mit der Bildung von Eisennitriden und mit dem dadurch verursachten Verlust an Dehnvermögen, lassen den Stahl nicht ohne besondere Maßnahmen als schweißgeeignet erscheinen.

Sollte es sich bei den zu schweißenden Stählen um Stähle VK<sub>1</sub> oder VK<sub>2</sub> handeln, kann eine Schweißeignung jedoch gegeben sein. Hier kommt es auf die Ergebnisse von **Laboruntersuchungen** an.

Ältere Kollegen haben noch in den 1990er-Jahren bei der Bemessung von Stahltragwerken „Stahl in schweißgeeigneter Güte“ verlangt, wohl wissend, dass zur Zeit ihrer Ausbildung Stähle nicht ohne Weiteres schweißgeeignet waren.

## 3.7 Elektrostahl

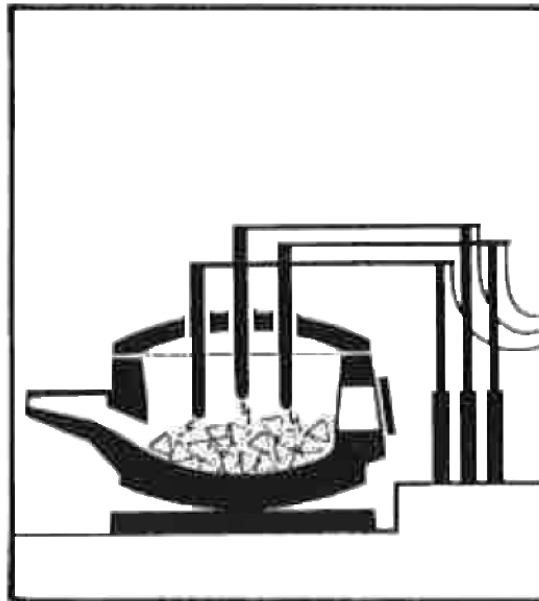
### 3.7.1 Herstellung

Der Elektro- oder Lichtbogenofen wird 1878 von Wilhelm Siemens erdacht und 1887 von Héroult im Rahmen der Aluminiumherstellung weiterentwickelt und patentiert.

Im Jahre 1898 wird schließlich der erste industrielle Lichtbogen-Schmelzofen für die Stahlerzeugung vorgestellt, und im Jahre 1906 erfolgt bei Lindenberg in Remscheid die erste Schmelze in Deutschland.

Eine weit verbreitete Bauform des Ofens – im Englischen Electric Arc Furnace (EAF) – ist der feuerfest ausgemauerte Héroult-Ofen mit drei Kohleelektroden (siehe Abbildungen 3.14, S. 47 und 3.15, S. 48). Diese Elektroden spannen einen Lichtbogen zur Beschickung des Ofens, dem Einsatz, der hohe Temperaturen – bis 3.500 °C – erzeugt. Bei diesem Verfahren fehlen die wärmeabführenden Verbrennungsgase, die bei anderen Erzeugungsmethoden das Absinken der Temperatur bedingen.





**Abbildung 3.14:** Schematische Darstellung eines Lichtbogenofens [64]

Im Gegensatz zu den Konverterverfahren werden allerdings hier an den Einsatz hohe Anforderungen gestellt. Der Ofen muss mit vorgefrischem Stahl und Schrott, Schrott oder Eisenschwamm und Schrott beschickt werden [65].

Die zum Zünden des Lichtbogens notwendige Starkstromtechnik steht zu einem erfolgreichen Industrieinsatz erst um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert zur Verfügung. Insofern sind die ersten erfolgreichen Schmelzen mit drei Tonnen Einsatz kleine Schmelzen.

Der große Vorteil ist, dass bei diesem **Herdverfahren** keine Verunreinigungen durch Winde ins Schmelzbad geblasen werden. Der Wind ist als Lieferant von Sauerstoff – und damit Verbrennungsenergie – nicht erforderlich.

Um jedoch ausreichend Sauerstoff zum Frischen des Kohlenstoffs zur Verfügung zu haben, werden entsprechende Erze zugeführt.

Durch gezielte Zugabe von Legierungselementen können spezielle Stähle erschmolzen werden, sodass dieses Verfahren vorerst den hoch legierten Stählen vorbehalten ist. Erst in jüngerer Zeit wird das Verfahren auch für die Massenproduktion von Stählen herangezogen.

Dieses Verfahren hat 2011 einen Anteil von rund 30 % an der Stahlerzeugung in der Bundesrepublik. Umgerechnet handelt es sich dabei um 14.000.000 Tonnen



**Abbildung 3.15:** Lichtbogenofen mit noch glühenden Kohleelektroden im Stahlwerk Gröditz [66]

Stahl. Das Elektrostahlverfahren ist hochaktuell und wird beständig weiterentwickelt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Elektrostahl keine Rolle spielen, da er erst in jüngerer Zeit für Baustähle zur Anwendung kommt.

#### 3.7.2 Metallurgie

Stahl, der auf diese Art erschmolzen wird, kann jedes gewünschte Legierungselement enthalten. Es wird nach dem Schlackenablauf der Schmelze beigemengt.

#### 3.7.3 Schweißeignung

Die Schweißeignung ist abhängig von den erschmolzenen Stählen gegeben. Unlegierte Baustähle, die auf diese Art erschmolzen werden, sind hochgradig rein

und stets schweißgeeignet.

## 3.8 Siliziumstahl

### 3.8.1 Herstellung

Der Siliziumstahl wird 1884 für Hadfield in England patentiert. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um ein Herstellungsverfahren, sondern vielmehr um eine besondere metallurgische Zusammensetzung des Werkstoffes.

Die Herstellung von Siliziumstahl erfolgt in den zur Verfügung stehenden Konvertern (Bessemer bzw. Thomas) oder Herden (Siemens-Martin bzw. Elektro).

Nach Aussage von KUSCHER [44] wird dieser Stahl in den Jahren 1926 bis 1929 erschmolzen. SCHLEICHER [67, S. 559] spricht davon, dass der Baustahl St Si ab 1925 erzeugt wird und sich in den Baustahl St 52 weiterentwickelt habe.

### 3.8.2 Metallurgie

Im Zuge der Herstellung von Siliziumstahl wird versucht, durch erhöhte Zugabe von Silizium die Festigkeiten zu erhöhen.

Dieser Stahl weist die Besonderheit auf, dass das Silizium mit dem Sauerstoff feste Oxidationsprodukte bildet, die sich als trennende Substanzen zwischen den Korngrenzen ablagern. Dadurch wird die Warmformbarkeit des Stahles beeinträchtigt [68].

Siliziumstahl schwindet bei der Erstarrung sehr stark und bildet Lunker, die teilweise bis in den Fuß des vergossenen Blockes reichen.

Dadurch lagert dieser Stahl, der im Bauwesen sehr selten vorkommt, Schlacken in Zeilen an. Sein Siliziumgehalt kann  $> 2\%$  betragen. KUSCHER [44] spricht von lediglich vier nachgewiesenen Bauwerken in Deutschland.

Nach Aussage von SCHLEICHER [67] beträgt der Gehalt an Silizium zwischen  $0,80\%$  und  $1,20\%$ , der Anteil an Kohlenstoff zwischen  $0,08\%$  und  $0,18\%$ .

Damit liegt er etwa im Bereich heutiger Stähle (siehe Tabelle 3.4, S. 24), wobei dort der Anteil an Silizium in der Schmelze nicht geregelt ist.

#### 3.8.3 Schweißeignung

Siliziumstähle sind nach KUSCHER [44] als **nicht schweißgeeignet** einzustufen. Seine Analysen haben neben dem hohen Gehalt an Silizium (2,05 %) erhöhte Gehalte an Schwefel (0,251 %) und Phosphor (0,441 %) ergeben.

Allein die Werte für Schwefel und Phosphor schließen diesen Stahl von der Schweißung aus. Die erhöhten Anteile an Silizium lassen die Festigkeitswerte anwachsen, bilden aber in zu großem Maße Schlacken, die während des Walzens in Zeilen gepresst werden.

Die Möglichkeit, diese Zeilen während des Schweißens anzuschmelzen und weitergehende Verunreinigungen zu erzeugen, sind ein weiterer Grund, diesen Stahl nicht mit Schweißprozessen zu bearbeiten.

Die aktuelle Normung [38] nennt bei höherfesten Baustählen einen Siliziumgehalt von 0,55 %. In der vorliegenden Probe beträgt er etwa das Vierfache.

## 3.9 Linz-Donawitz-Stahl

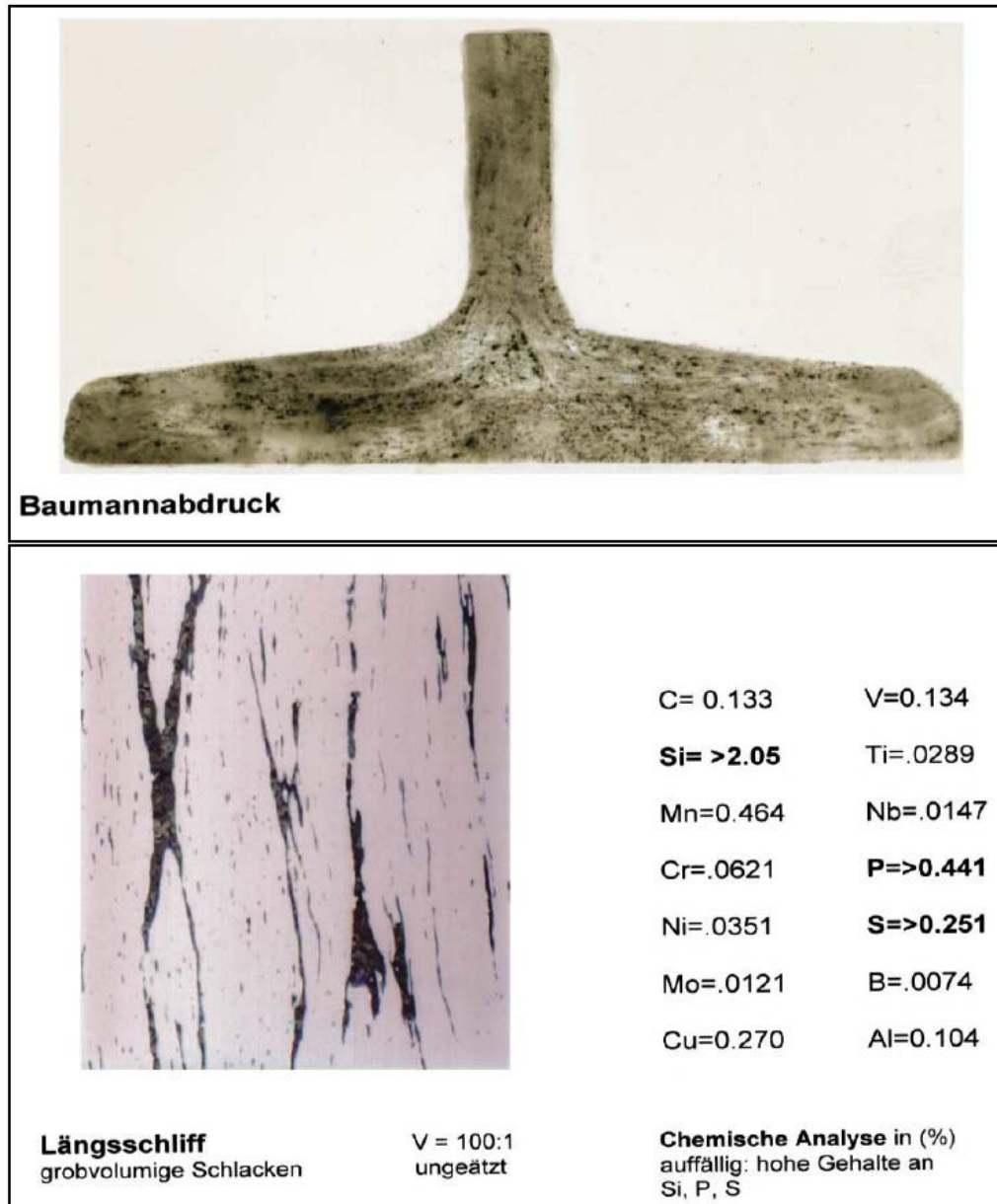
### 3.9.1 Herstellung

Das Linz-Donawitz-Verfahren (Linz-Durrer-Verfahren) ist eine Weiterentwicklung des Konverterverfahrens von Thomas. Diese Entwicklungen fußen maßgeblich auf den Forschungen des Schweizer Metallurgen Durrer.

Auch der LD-Konverter ist basisch zugestellt. Er geht im Jahre 1952 in Linz bei der Firma Voest in den Produktionsbetrieb. Dieses Verfahren ist wie alle Konverterverfahren ein **Windfrischverfahren**. Bei diesem wird Sauerstoff durch gekühlte Lanzen in einem Konverter auf die Schmelze aufgeblasen.

Das Aufblasen führt zu heftigen Reaktionen in der Schmelze, die dadurch stark verwirbelt wird. Zur Beruhigung des Bades wird vom Konverterboden aus Argon durch das Schmelzbad geblasen. Das hat den zusätzlichen Effekt, dass Wasserstoff mit dem Argon zusammen aus der Schmelze transportiert wird. Somit ist das Problem der wasserstoffinduzierten Rissbildung entschärft.

In Luxemburg wird dieses Verfahren teilweise durch das zusätzliche Einblasen von Kalkstaub modifiziert. Der Prozess trägt dann die Bezeichnung LD-AC-Verfahren.



**Abbildung 3.16:** Siliziumstahl (St Si) nach [44], oben Baumann-Abdruck, darunter Längsschliff mit ausgeprägter Schlackenzeiligkeit sowie mit chemischer Analyse

Die heute geläufige Bezeichnung für diese Verfahren der Stahlerzeugung lautet Oxygenstahlverfahren oder Sauerstoffaufblasverfahren. Sein Anteil an der Stahlerzeugung in der Bundesrepublik liegt im Jahr 2011 bei rund 30.000.000 Tonnen [53]. Es ist heute noch erfolgreich an der Stahlerzeugung beteiligt.

Da dieser Stahl in der Chronologie der Erzeugungsverfahren „zu jung“ ist, kommt er für die vorliegende Ausarbeitung als Untersuchungsobjekt nicht in Betracht. Er wird nicht weiter betrachtet.

#### **3.9.2 Metallurgie**

Dieser Stahl weist geringe Mengen an Kohlenstoff, Stickstoff, Silizium und den besonders schädlichen Eisenbegleitern Schwefel und Phosphor auf.

#### **3.9.3 Schweißeignung**

Die Schweißeignung ist ohne jede Frage ohne Einschränkungen gegeben. Alle heute verfügbaren Stähle werden in diesem Verfahren erschmolzen.

### **3.10 Vergießungsverfahren des Stahles**

Das teigig gewonnene Puddeleisen hat – bei allen Nachteilen – dem flüssig-schmelzenden Werkstoff gegenüber einen Vorteil: Es wird während des Frischens aufgrund des Anstieges der Solidustemperatur im Herd zunehmend fester. In diesem Zustand kann es als „Luppe“ aus dem Herdofen gehoben, gehämmert – oder, wie es zeitgenössisch lautete, verschweißt – und danach ausgewalzt werden.

Der flüssig gewonnene Werkstoff hingegen muss zunächst außerhalb des Konverters oder Ofens abkühlen und in diesem Zustand zwischen Liquidus und Solidus transportiert werden.

Dazu wird der schmelzflüssige Stahl in eine Dauerform gegossen, in der er langsam – das kann abhängig von der Größe bis zu 30 Stunden dauern – abkühlt. Diese Dauerform wird von den Eisenhüttenleuten Kokille (siehe hierzu Abbildung 3.17, S. 54) genannt. Die Kokille wird durch Krane oder Eisenbahnwaggons zum Walzwerk transportiert. Dort wird sie „gezogen“, Block und Kokille werden getrennt. Danach setzt in warmem Zustand der Walzvorgang zu Halbzeugen ein.

Heute wird Stahl nur noch selten in Blöcken vergossen. Dieses Verfahren, das **Blockgussverfahren**, wird für die Massenproduktion vom **Stranggussverfahren** abgelöst.

Der Verguss im Strang bedeutet ein permanentes Verarbeiten des Stahles in einem direkt an die Stahlerzeugung – zeitlich wie auch örtlich – angeschlossenen Walzprozess zu Halbzeugen. Der Stahl wird dabei zunächst in einer beidseits offenen Kokille gekühlt, durch die der schmelzflüssige Werkstoff hindurchläuft.

Der Strangguss scheidet aufgrund seiner zeitlichen Einordnung, er wurde etwa 1964 eingeführt, als Vergießungsverfahren für Altstähle aus und wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Der Blockguss jedoch ist die typische Art des Gusses für Altstähle. Der schmelzflüssige Werkstoff kühlt in der Kokille ab. Im Zuge dieses Abkühlens kommt es jedoch zu metallurgischen Veränderungen des Werkstoffes.

An der Kokillenwand erstarrt der Stahl zuerst, da er hier seine Wärme an die Kokille abgeben kann. Die Erstarrung erfolgt hier sehr rein, da die niedriger schmelzenden Verunreinigungen schmelzflüssig bleiben. Durch das dendritische Wachstum der Keime werden diese Verunreinigungen von dem erstarrenden Werkstoff von außen nach innen in den Block geschoben. Es kommt zu sogenannten **Blockseigerungen**.

Die für das Herstellungsverfahren typischen Verunreinigungen, beispielsweise durch Phosphor und Schwefel, befinden sich also im Inneren des Blockes. Daneben verändern sich auch die Konzentrationen der Eisenbegleiter über die Höhe und über die Breite des Blockes (siehe Abbildung 3.18, S. 55).

Wird dieser Block anschließend ausgewalzt, bilden sich sogenannte Speckschichten – reine Bereiche – und Seigerungen – verunreinigte Bereiche. Diese Bereiche lassen sich durch spezielle Ätzverfahren, zum Beispiel das Verfahren nach Baumann, sichtbar machen. Auf Seite 51 ist der Baumann-Abdruck eines Siliziumstahles dargestellt, auf Seite 57 ein Baumann-Abdruck eines Rundstahles.

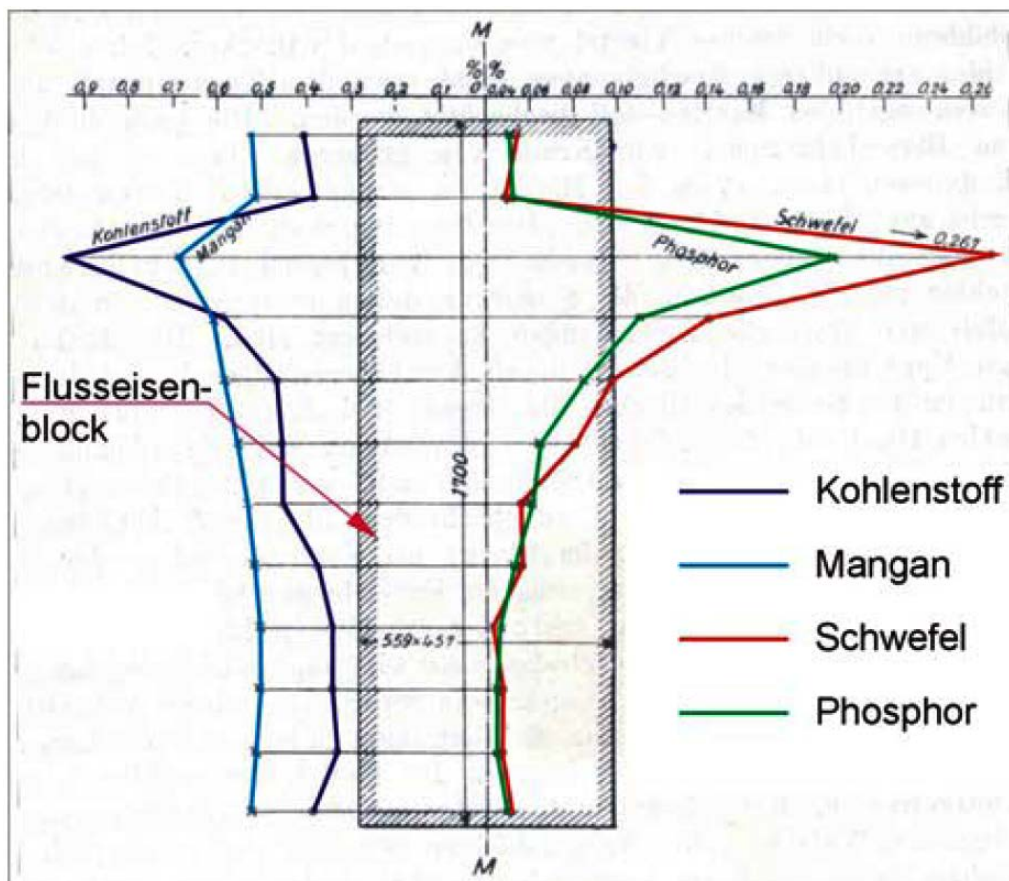
Die Vergießungsarten werden auch als Desoxidationsverfahren bezeichnet, da ihre vornehmste Aufgabe ist, den im Stahl gelösten Sauerstoff zu entfernen, den Stahl zu desoxidieren.





**Abbildung 3.17:** Kokille auf einem Schrottplatz der Henrichshütte in Hattingen [69]; zum Größenvergleich möge die Spurweite der Schienen von 1.435 mm dienen





**Abbildung 3.18:** Konzentration verschiedener Begleitelemente über die Blockhöhe nach VDE (entnommen aus [1, S. 19])

### 3.10.1 Unberuhigt vergossener Stahl

Dieser Stahl wird beim Erzeugen und beim Vergießen nicht durch begleitende mechanisch-technologische Maßnahmen verändert. Daher weist er noch einen relativ hohen Gehalt an Sauerstoff auf. Beim Erstarren befinden sich die Verunreinigungen, vor allem Phosphor und Schwefel, im Inneren des Blockes. Es kommt dort zu Entmischungen des Gefüges.

Das geschieht, da in der Restschmelze mit sinkenden Temperaturen vor allem Sauerstoff in Form von Kohlenmonoxid gasförmig ausgeschieden wird: Die erstarrende Schmelze „kocht“. Dieses Kochen transportiert die Verunreinigungen im Block nach innen und oben.

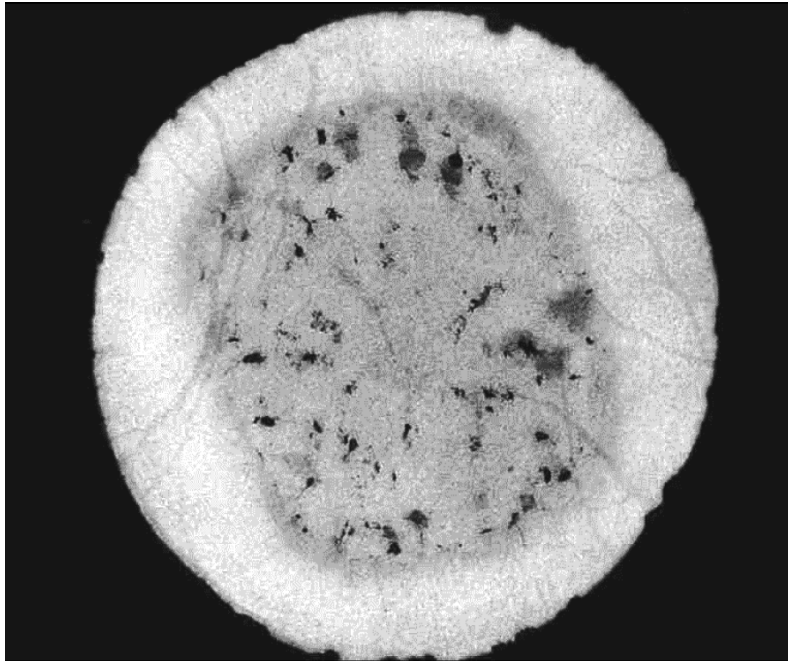
Die Ausgasungen durchwirbeln die Schmelze, der Stahl erstarrt unruhig. Daher rührt die Bezeichnung. Somit befinden sich im Inneren und am Kopf des Blockes Zonen, die stark verunreinigt sind. PETERSEN [70, S. 14] stellt fest, dass für geseigerte Profile etwa folgende Werte an Schwefel und Phosphor anzunehmen sind:

Profilbereich	Phosphor P	Schwefel S
Gesamtquerschnitt	~ 0,07	~ 0,05
Kernzone	~ 0,20	~ 0,12
Randzone	~ 0,04	~ 0,02

**Tabelle 3.6:** Anhaltswerte für Gehalte an Phosphor und Schwefel in unberuhigt vergossenen Profilen nach [70, S. 14] (Angaben in Massen-%)

Die unberuhigt vergossenen Stähle sind hinsichtlich ihrer Schweißseignung sehr kritisch zu beurteilen. In den geseigten Zonen ist mit einer erhöhten Neigung zur Aufhärtung und Altersversprödung zu rechnen. Weiterhin ist hier beim Schweißen mit Porenbildung und Heißrissgefahr zu rechnen. Die noch enthaltenen Anteile an Sauerstoff gasen als CO aus und führen zu Poren. Der in den Seigerungen enthaltene Schwefel induziert eine Heißrissneigung.

Diese Aussage trifft grundsätzlich auf alle unberuhigt vergossenen Stähle zu, auch auf die, die durch eher unkritische Verfahren wie das Siemens-Martin-Verfahren erschmolzen wurden.



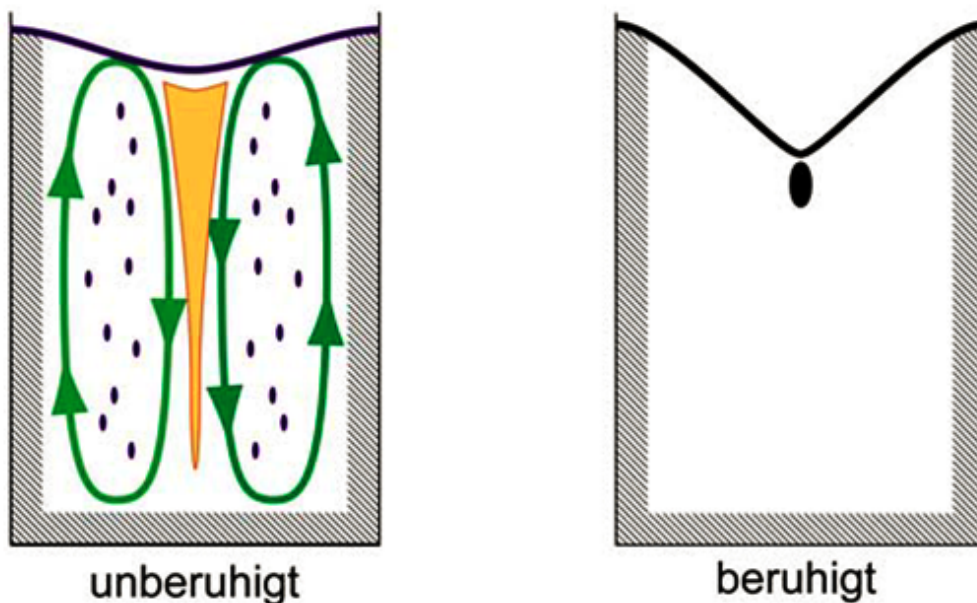
**Abbildung 3.19:** Makroschliff (Querschnitt) durch einen Rundstahl mit Speckschicht (hell), Seigerungen (dunkel), Einschlüssen (schwarz) und Fry'schen Kraftwirkungslinien (grau) (nach [54, S. 8])

Hierzu muss vonseiten der Schweißtechnik festgestellt werden, dass beim Schweißen aus diesem Grunde die Seigerungszone möglichst nicht angeschmolzen werden sollten [1] [54]. Ein Schweißen muss im „sauberen“ Randbereich, der **Speckschicht**, erfolgen.

Nach Kenntnis dieser Zusammenhänge wurde bei der Herstellung die Kennzeichnung U bzw. G1 für diese Stähle eingeführt (Beispiele: USt 37-2 oder auch St 37-2 U nach DIN 17100 [31], S235JRG1 nach DIN EN 10025:1994-03 [33]). Heute sind Stähle, die auf diese Art vergossen wurden, nicht mehr zulässig [38].

### 3.10.2 Beruhigt vergossener Stahl

Dieser Stahl wird vor dem Prozess des Vergießens mit Legierungselementen beaufschlagt, die dem Sauerstoff in der Schmelze gegenüber hochaffin sind und mit diesem eine Schlacke bilden. Damit wird die Schmelze desoxidiert, der Sauerstoff wird chemisch abgebunden.



**Abbildung 3.20:** Prinzipielles Verhalten von unberuhigt und beruhigt vergossenem Stahl [71]

Hierzu wird vor allem Silizium, teilweise auch Aluminium und bzw. oder Mangan, hinzulegiert. Der wesentliche Effekt dieser Maßnahme ist, dass die Aufkonzentration der unerwünschten Eisenbegleiter, vor allem des Phosphors und des Schwefels, in der Mitte des Blockes unterbleibt. Zudem senkt das zugeführte Silizium den Anteil beider Elemente in geringem Maße. Die seigernden Elemente sind nach wie vor vorhanden, jedoch ist ihre Konzentration über den gesamten Block gleichmäßig verteilt.

Am Kopf des Blockes bildet sich ein charakteristischer tiefer Kopflunker, der vor dem Weiterverarbeiten abgetrennt wird, da er sich sonst als Dopplung im ausgewalzten Profil wiederfindet und beim Schweißen oder beim Feuerverzinken zu Trennungen des Materials führt.

Abbildung 3.20, S. 58 zeigt die Unterschiede im Erstarrungsverhalten von unberuhigt und beruhigt vergossenen Blöcken.

Stähle, die auf diese Art vergossen wurden, trugen die Kennzeichnung R bzw. G2 (Beispiele: RSt 37-2 oder St 37-2 R nach [31], S235JR G2 [33], S235JR+AR nach DIN EN 10025 [38]). Nach aktueller Normung trägt dieses Verfahren der Vergießung die Bezeichnung FN [38].

### 3.10.3 Besonders beruhigt vergossener Stahl

Dieser Stahl wird auch als voll beruhigter Stahl bezeichnet. Seine frühere Bezeichnung lautet RR bzw. G3 oder G4.

Bei diesem Verfahren werden der Schmelze neben den bereits genannten Elementen Silizium und Mangan definierte Mengen an Aluminium beigemengt. Dabei sind mindestens 0,02 % Aluminium erforderlich. Es können allerdings auch Niob, Titan oder Vanadium hinzulegiert werden.

Durch den Zusatz von Aluminium entsteht Aluminiumoxid, das als Keimbildner wirkt und einen feinkörnigen Stahl entstehen lässt. Zusätzlich bindet das Aluminium den Stickstoff ab und führt zur Bildung von unschädlichem Aluminiumnitrid. Ein auf diese Art vergossener Block erstarrt praktisch ohne Blasenbildung.

In Kenntnis dieses Umstandes haben die Hersteller der Kopfbolzendübel ihre Produkte mit einer aufgedampften Aluminiumschicht versehen, sodass bei der Zündung das Aluminium für eine Beruhigung (volle Beruhigung) des Schweißbades sorgt.

Wer, wie der Verfasser auf eigenen Baustellen schon erlebt hat, zu lang bestellte Kopfbolzendübel abschneidet, trennt bei einer Spitzenzündung den Kontaktdorn ab. Aber er trennt auch den Zusatz an Aluminium ab, den das Schweißbad benötigt, um ohne Blasenbildung (Poren) besonders beruhigt zu erstarren.

Die heutige normative Bezeichnung für diese Vergießungsart lautet FF [38]. Diese Vergießungsart des Stahles ist bei Altstählen eher selten anzutreffen. Sie spielt im Rahmen dieser Arbeit daher keine weitere Rolle.

## 3.11 Erläuterung der Terminologie Eisen und Stahl

### 3.11.1 Frühere Normstände

Die sprachliche Regelung der Jahrzehnte von 1760 bis 1930 ist noch nicht durch einheitliche Parameter aus Normungen geprägt. Sie erfolgt vielmehr ein wenig willkürlich. In den frühen Jahren der Herstellung von Stahl wird häufig von Schweißstahl, Schweißisen, Flussstahl und Flusseisen gesprochen. Was hat es damit auf sich?

HELMERICH [2, S. 18] berichtet, dass der Deutsche Verband für Materialprüfung in der Technik 1906 festlegt, dass

- Flussstahl eine Zugfestigkeit von mindestens 50 kg/mm<sup>2</sup> habe,
- Schweißstahl eine Zugfestigkeit von mindestens 42 kg/mm<sup>2</sup> habe und
- Flusseisen und Schweißeisen alle Festigkeiten darunter aufweisen könnten.

Es erfolgt also eine Festlegung über den Materialkennwert der Zugfestigkeit. Im Jahre 1925 legt die Obmännerversammlung des Werkstoffausschusses fest, dass Material, das teigig gewonnen wird, Schweiß- oder Puddelstahl ist. Material, das dagegen flüssig gewonnen wird, ist Flussstahl.

Diese Zusammenfassung übernimmt LORENZ [72, S. 9] und verfeinert sie weiter. Alle Erzeugnisse der damaligen Zeit werden nach heutiger Terminologie als Stahl bezeichnet. Es sind Eisenlegierungen mit einem Kohlenstoffgehalt von weniger als 2,10 %.

Schweißstahl und Schweißeisen werden in einem teigigen Zustand gewonnen, der es erforderlich macht, die Luppen noch nachträglich zusammenzuschweißen – in einem Luppenquetscher.

Flussstahl und Flusseisen werden dünnflüssig in einem Konverter oder einem Ofen gewonnen, ein nachträgliches Zusammenschweißen ist nicht erforderlich.

Der Unterschied zwischen Eisen und Stahl wird in vergangenen Zeiten vornehmlich auf die Härthbarkeit des Werkstoffes bezogen. Ein Eisen lässt sich nicht härten, ein Stahl schon. Damit lassen sich Rückschlüsse auf den Gehalt an Kohlenstoff ziehen. Dieser muss für die bessere Härthbarkeit höher sein.

„Etwas vergrößert lässt sich somit aus den jeweils ersten Silben von Schweißeisen, Schweißstahl, Flusseisen und Flussstahl der Herstellungsprozess (Puddeln oder Frischen) und aus den zweiten Silben die Härthbarkeit des Materials sowie indirekt der ungefähre Kohlenstoffgehalt ableiten“[72, S. 9].

#### 3.11.2 Heutiger Stand der Normung

Der Begriff Stahl ist heute im europäischen Raum durch das geltende Normwerk der Europäischen Gemeinschaft geregelt. Stahl ist eine Eisenlegierung mit höchstens 2,0 % Kohlenstoff. Es können weitere Eisenbegleiter vorhanden sein.

Die normative Formulierung in DIN EN 10020:2000-03 lautet:

„Stahl. Werkstoff, dessen Massenanteil an Eisen größer ist als der jedes anderen Elementes, dessen Kohlenstoffgehalt im Allgemeinen kleiner als 2 % ist und der

andere Elemente enthält. Eine begrenzte Anzahl von Chromstählen kann mehr als 2 % Kohlenstoff enthalten, aber 2 % ist die übliche Grenze zwischen Stahl und Gusseisen“ [73, S. 2].

Im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (siehe Abbildung 3.3 auf Seite 27) entwickelt sich diese Grenze exakt bei 2,06 %. Insofern ist auch die abweichende Formulierung der zurückgezogenen DIN 17100 (dort Tabelle 1) [31] als Abschätzung zu verstehen.

Ab einer Grenze von rund 0,21 % an Kohlenstoff aufwärts wird von einer eingeschränkten Schweißbarkeit gesprochen. Diese Stähle neigen beim Abkühlen dazu, einen martensitischen Gefügestand einzunehmen. Das ist ein Gefüge, das hohe Festigkeiten aufweist, dabei aber eine nur noch sehr verminderte Dehnfähigkeit mitbringt. Zusätzlich dazu kann es zu einer Bildung von Grobkorn im Bereich der Wärmeeinflusszone kommen. Durch Grobkörner können Risse leichter entstehen, bzw. vorhandene Mikrorisse werden nicht durch feinkörniges Gefüge aufgehalten. Das Rissauffangvermögen im Bereich der Schweißnaht ist schlechter als im Grundmaterial.

Für den Fall einer Schweißung kann es bei Stählen dieser Art erforderlich werden, die Stähle vorzuwärmen, bestimmte Zwischenlagentemperaturen einzuhalten oder diese Stähle kontrolliert, zum Beispiel in einem Ofen, abkühlen zu lassen.

Aus Sicht der Schweißtechnik wird hier die  $t_{8/5}$ -Zeit wesentlich. Das ist die Zeit, die benötigt wird, um die Temperaturen von 800 °C bis 500 °C beim Abkühlen der Schweißraupe und der Wärmeeinflusszone zu durchlaufen. Wird diese Temperaturspanne zu schnell durchlaufen, können sich im Gefüge harte und spröde Martensite bilden.

Neben dem Gehalt an Kohlenstoff haben auch andere Eisenbegleiter Einfluss auf die Schweißbarkeit der Stähle. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, wird bei unlegierten und niedrig legierten Stählen ein Kohlenstoffäquivalent gebildet, das als Indikator für die Schweißbarkeit dienen kann. Davon gibt es einige, die unterschiedlich formuliert werden. HUBO und SCHRÖTER fassen sie in [74, S. 561] zusammen:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (3.2)$$

$$PCM = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B \quad (3.3)$$

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (3.4)$$

- Carbon Equivalent Value (CEV): Bei Kohlenstoffgehalten über 0,18 % wird damit durch ein  $CEV < 0,45 \%$  eine gute Schweißbarkeit angezeigt, bei Werten  $CEV > 0,65 \%$  wird ein erhöhter Aufwand, zum Beispiel durch Vorwärmen, nötig.
- Critical Metal Parameter (PCM): Hierdurch wird bei Wurzelschweißungen und bei kurzen Abkühlzeiten Schweißbarkeit abgebildet.
- Carbon Equivalent Thyssen (CET): Bei diesem Äquivalent wird besonders auf kurze Abkühlzeiten und Kalttrissigkeit in und an der Schweißnaht abgestellt.

Das CEV, häufig auch nur CE genannte Äquivalent wurde vom International Institute of Welding (IIW) vorgeschlagen und wird häufig bei Werkstoffzeugnissen mit angegeben.

Die Vorwärmtemperatur für das Schweißen von Feinkornbaustählen wird nach dem Stahl-Eisen-Werkstoffblatt SEW 088 [75] berechnet. Diesem liegt zum Beispiel das CET zugrunde [74, S. 561].

Jedes der genannten Äquivalente hat zum Ziel, die Aufhärtung des Werkstoffes beim Schweißen abzuschätzen. Geringe Kohlenstoffäquivalente deuten auf eine geringe Neigung des Stahles hin, nach dem Schweißen aufzuhärten, indem sie beim Abkühlen Martensite bilden.

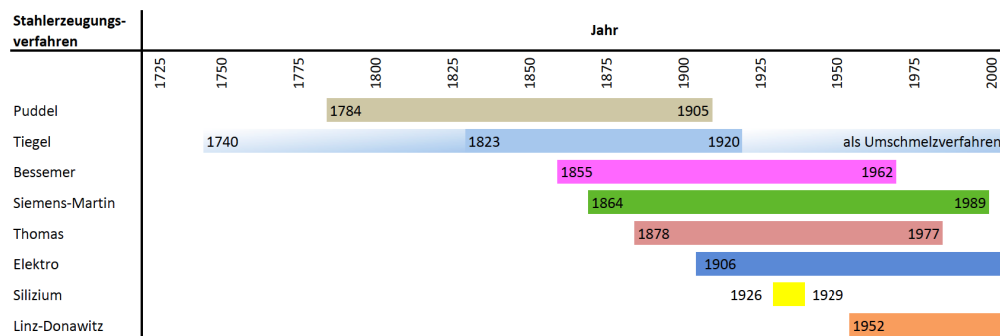
Die Grenze von 2,10 % erfolgt nicht willkürlich, sondern leitet sich vom Eisen-Kohlenstoff-Diagramm ab (siehe Abbildung 3.3 auf Seite 27). Dort zeigt sich die Grenze zwischen Stahl und Gusseisen am Punkt E. Ab dieser Stelle bilden sich bei der Abkühlung Ledeburite und der Werkstoff verliert an Zähigkeit.

Dieser Definition folgend, handelt es sich bei allen genannten Bezeichnungen, wie zum Beispiel Flusseisen oder Schweißeisen, aber auch Flussstahl und Schweißstahl, um Stähle.



### 3.12 Übersicht über die Herstellungszeiträume

Die Erzeugungsverfahren für Altstahl überschneiden sich teilweise deutlich. Zur Visualisierung möge Abbildung 3.21 (S. 63) dienen.



**Abbildung 3.21:** Übersicht über die Herstellungszeiträume, aufgeteilt nach Verfahren (gilt nur im deutschsprachigen Raum)

Es darf nicht unerwähnt bleiben, dass es sich hierbei um Mittelwerte handelt, die sich auf den deutschen bzw. deutschsprachigen Raum beziehen. Abbildung 3.22 (S. 64) verdeutlicht die Anwendungszeiträume der Stahlherstellungsverfahren und die ausgebrachte Tonnage ab 1950.

Klar zu erkennen ist, dass im Zeitraum von rund 1880 bis 1910 die Herstellung der Werkstoffe für Bauwerke nach dem Puddel-, Bessemer-, Siemens-Martin-, Thomas- und Elektrostahlverfahren parallel erfolgt.

Nach dem Wegfall des Puddelverfahrens kommt kurzfristig der Siliziumstahl hinzu, um alsbald wieder zu entfallen. Mit dem Linz-Donawitz-Verfahren als Vertreter der Sauerstoffaufblasverfahren sind an den Herstellprozessen ab 1952 wieder fünf Verfahren beteiligt.

Aus den Überlegungen zu den Herstellungszeiträumen kann im Groben schlussgefolgert werden, dass

- Bauwerke, die vor 1855 hergestellt wurden, wohl aus Puddelstahl (Schweiß-eisen, Schweißstahl) erbaut wurden,
- Bauwerke, die danach bis rund 1910 errichtet wurden, mit allen fünf in diesem Zeitraum zur Verfügung stehenden Stählen hergestellt worden sein konnten,

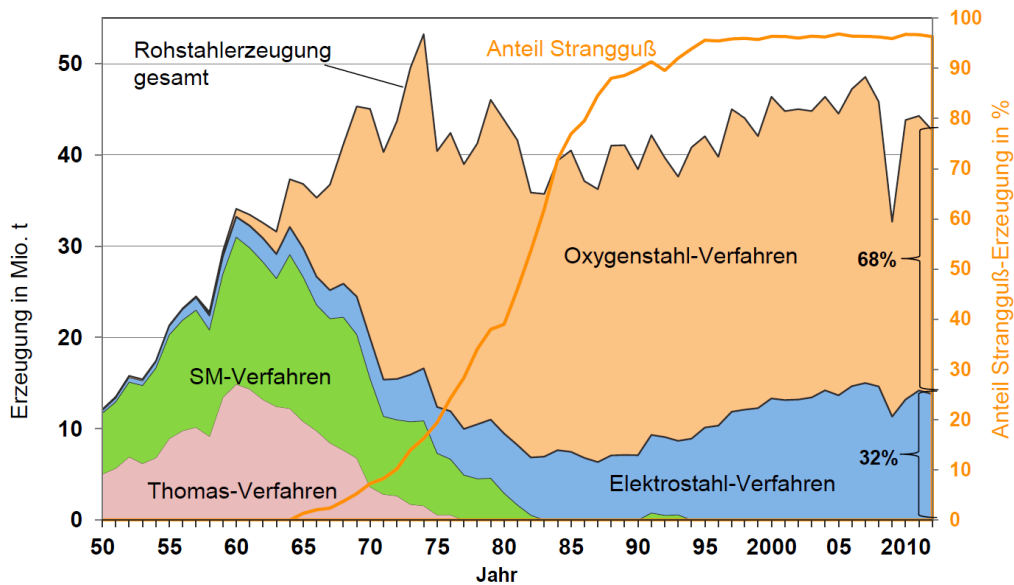


Abbildung 3.22: Rohstahlerzeugung in Deutschland nach Verfahren [76]

- später (bis etwa 1952) errichtete Bauwerke mit den zeitlich korrespondierenden Stählen errichtet worden sein konnten.

Erschwerend kommt hinzu, dass nicht alle Profile und Bleche eines Bauwerkes aus nur einem Stahl errichtet worden sein müssen. Innerhalb der Bestellung des Materials wird auch in den vergangenen Zeiten sehr wohl abgewogen worden sein, ob „untergeordnete“ Bauteile nicht in einem preisgünstigeren Stahl ausgeführt werden können.

Zudem ist bei vielen Bauwerken, die nach dem Zweiten Weltkrieg instand gesetzt wurden, nicht auszuschließen, dass einzelne instand zu setzende Tragwerksteile aus Trümmerteilen anderer Bauwerke geborgen wurden [44, S. 3].

Die Frage nach den verwendeten Vergießungsverfahren für die zahlreich möglichen Stähle in dem speziellen betrachteten Bauwerk ist dann jedoch noch nicht gestellt.

Alle genannten Umstände lassen in ihrer Gesamtheit wiederum für die an diesen Werkstoffen Arbeitenden nur einen Schluss zu:

**Der Identifikation des verbauten Stahles und seiner technologisch-mechanischen Werte kommt in jedem Einzelfall eine enorme Bedeutung zu.**

MÖLL hat bei seinen Arbeiten am Eisernen Steg [25, S. 7] jedes schweißtechnisch bearbeitete Bauteil aus Altstahl untersucht und unter anderem durch dieses Prozedere ein 1912 errichtetes Bauwerk erfolgreich in einen aktuellen Stand (1997) gebracht.



## **4 Identifizierung der Altstähle**

Es gilt, die verbauten Stähle zu identifizieren und eine geeignete Sanierung zu initiieren. Das ist unmittelbar einsichtig, aber schwierig durchzuführen. Nachfolgend wird eine mögliche Verfahrensweise zur Identifizierung vorgestellt.

### **4.1 Identifizierung anhand der Bauzeit**

Eine erste Einschätzung des Werkstoffes kann anhand der Bauzeit erfolgen. Allerdings lässt das zeitgleiche Verwenden mehrerer Herstellungsverfahren keine eindeutige Zuordnung zu. Dieser Weg kann demnach nur eine erste, sehr grobe Einschätzung liefern.

### **4.2 Identifizierung anhand von Bestandsunterlagen**

Sofern Unterlagen über das Bauwerk vorliegen, die die Werkstoffe und deren Schweißbeignung zum Inhalt haben, ist es verlockend, diese Werte anzunehmen.

Aus Sicht des Verfassers ist hierbei jedoch Vorsicht walten zu lassen. Die vorliegenden Materialprüfzeugnisse mögen fehlerhaft oder falsch sein. Eine stichprobenartige Überprüfung der vorliegenden Werte ist unerlässlich.

### **4.3 Identifizierung anhand einer Schweißbeignungsprüfung**

Dieser Weg ist für Bauwerke ohne Bestandsunterlagen zwingend und für solche mit Bestandsunterlagen angeraten.

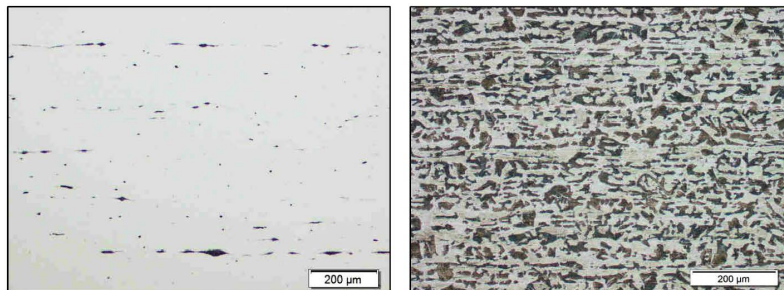
Aus dem zu modifizierenden Bauteil wird eine Probe entnommen. Diese wird einer Schweißbeignungsprüfung unterzogen. Sie untergliedert sich in mehrere Bearbeitungsschritte, die nachfolgend beschrieben werden.

### 4.3.1 Feststellen der Walzrichtung

Die Walzrichtung wird anhand mikrometallurgischer Verfahren bestimmt. Die Probe wird geschliffen, poliert und nach Spülen und Trocknen geätzt. Nach erneutem Spülen und Trocknen wird die Probe mikroskopisch untersucht und zeigt eine eindeutige Zeiligkeit. Aus dieser wird die Walzrichtung abgeleitet. Die Richtung der Zeilen entspricht der Walzrichtung (siehe Abbildung 4.1).

Die Zeiligkeit lässt Rückschlüsse auf die Fähigkeit des Werkstoffes zu, Beanspruchungen in Dickenrichtung – senkrecht zur Walzrichtung – aufzunehmen. Stähle mit ausgeprägter Zeiligkeit sind nicht ohne Weiteres in der Lage, Beanspruchungen in diese Richtung aufzunehmen. Aus diesem Grund wird in DIN EN 10614 [77] die Z-Güte als Werkstoffkennwert normativ festgelegt. Als Werte hierfür sind Z15, Z25 und Z35 geregelt. Die Güte Z15 fordert eine Brucheinschnürung von 15% beim Zugversuch in Dickenrichtung.

Ein Stahlerzeugnis mit ausgeprägter Zeiligkeit hat praktisch keine Kapazitäten in Dickenrichtung. Somit verbietet sich ein Anschluss, der eine Beanspruchung in Dickenrichtung, sei es auch nur aus Eigenspannung beim Abkühlen, in den Werkstoff einträgt.



**Abbildung 4.1:** Mikroschliff der Probe G01 in ungeätztem Zustand (links) und in geätztem Zustand (rechts) mit eindeutiger Zeiligkeit [78, S. 24]

### 4.3.2 Spektrometrie

Im Rahmen dieser Untersuchung wird die chemische Zusammensetzung der Proben geklärt. Durch eine Funkenerosionsentladung werden atomare Teilchen aus der Probe gerissen und von Detektoren aufgefangen (Abbildung 4.2, S. 69). Es werden drei Proben je Prüfstück gewonnen.



**Abbildung 4.2:** Dreifach abgefunkte Probe für die chemische Analyse der Probe G01 [78, S. 37]

Daraus wird die chemische Zusammensetzung der Probe ermittelt. Dieses Verfahren ist nicht in der Lage, die exakte Zusammensetzung von Puddeleisen zu bestimmen, da dieser Werkstoff eine ausgeprägte Schlackenzeiligkeit aufweist (vgl. Abschnitt 3.2.2) und somit die Gefahr besteht, bei der Untersuchung eine Schlackenzeile anzuschmelzen.

Als Ergebnis dieser Untersuchung werden aus den drei Proben die Mittelwerte für die Gehalte der Legierungselemente gebildet.

Chemie	Chemische Zusammensetzung [Massen-%]						
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,300	0,280	0,560	0,085	0,028	0,027	0,017
2	0,280	0,260	0,530	0,068	0,021	0,001	0,014
3	0,290	0,280	0,550	0,082	0,033	0,034	0,011
<b>Im Mittel</b>	<b>0,290</b>	<b>0,273</b>	<b>0,547</b>	<b>0,078</b>	<b>0,027</b>	<b>0,021</b>	<b>0,014</b>
Stahl	Thomasstahl (N), beruhigt oder sonderberuhigt (Si, Al)						

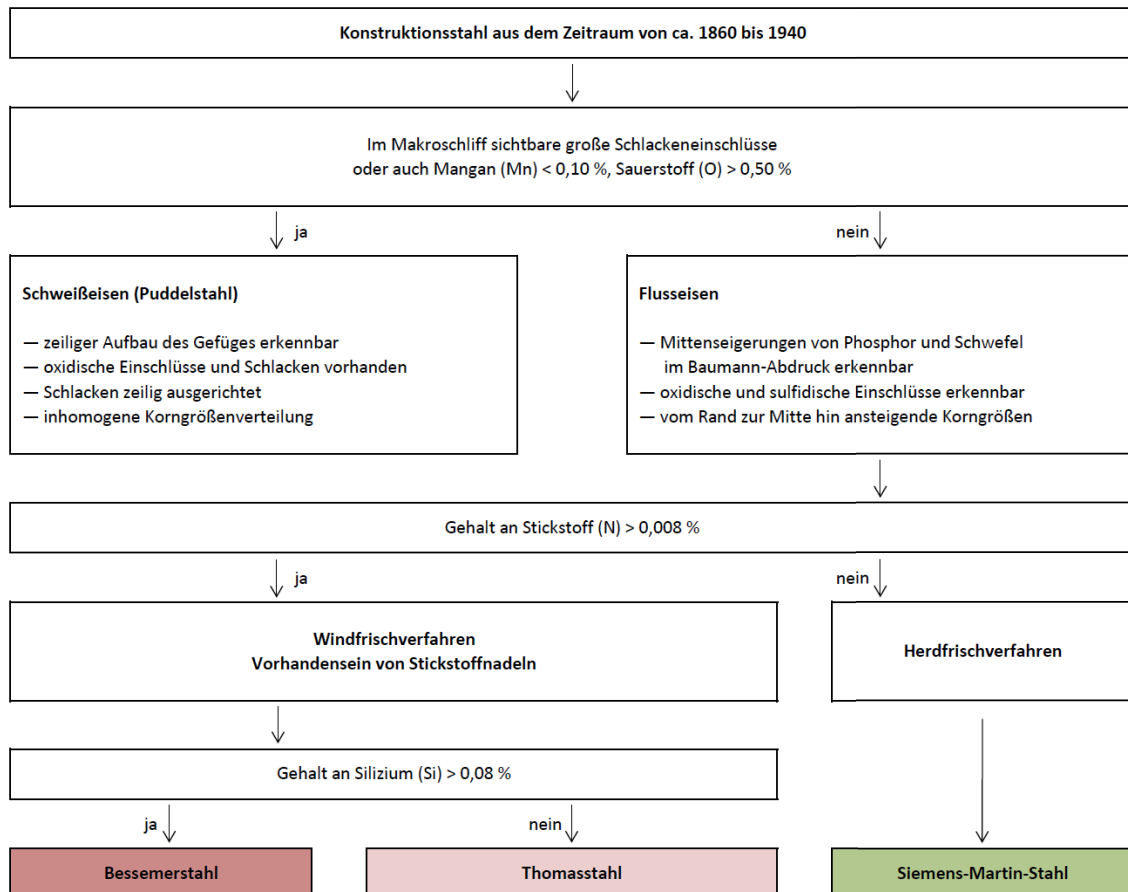
**Abbildung 4.3:** Chemische Zusammensetzung untersuchten Altstahles (Angaben in Massen-%), Probe G01, Auszug aus Anlage A.1

Die vorstehende Analyse deutet aufgrund des hohen Gehalts an Stickstoff auf einen windgefrischten Stahl – durch den Luft hindurchgeblasen wurde – hin. Die hohen Konzentrationen von Silizium und Aluminium sprechen für eine

#### 4 Identifizierung der Altstähle

beruhigte oder sonderberuhigte Vergießung. Der hohe Gehalt an Phosphor lässt das Erschmelzungsverfahren nach Thomas wahrscheinlich erscheinen.

LANGENBERG [58, S. 159] gibt in seiner Dissertation ein Schema zur Klassifizierung von Altstählen an (siehe hierzu Abbildung 4.4). Durch Makroschliffe und spektrometrische Untersuchungen kann unter Verwendung dieser Arbeitshilfe der Stahl klassifiziert werden.

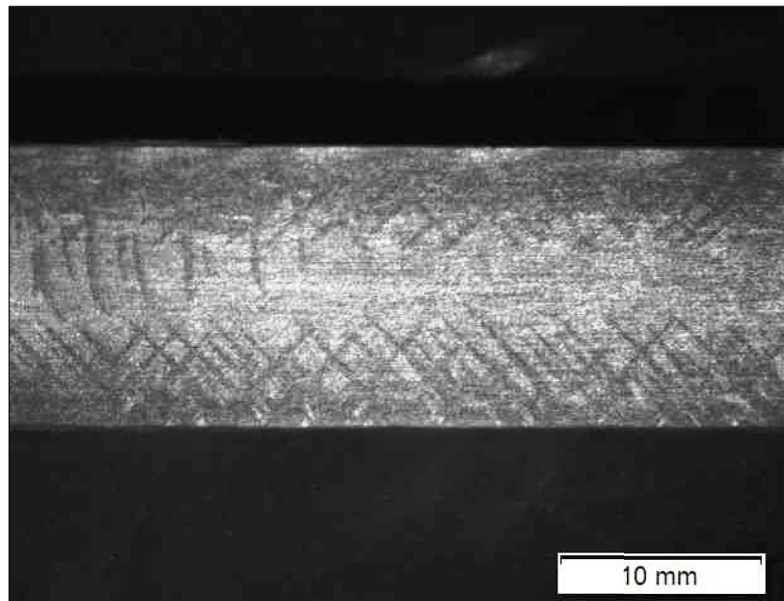


**Abbildung 4.4:** Klassifizierungshilfe für Stahlerzeugnisse nach LANGENBERG [58, S. 159]

Die genannte Probe G01 würde nach dieser Klassifizierung als Bessemerstahl betrachtet werden müssen.

Dass aber die makroskopische Untersuchung keine ausgeprägten Seigerungen bzw. ausgeprägten Speckschichten zeigt, lässt darauf schließen, dass die Probe G01 als beruhigter oder sonderberuhigter Stahl vergossen wurde. Das wiederum erklärt den hohen Gehalt an Silizium.





**Abbildung 4.5:** Makroaufnahme der Probe G01; es sind keine Speckschichten bzw. Seigerungen nachweisbar, ausgeprägte Fry'sche Kraftwirkungslinien, Ätzung nach Adler

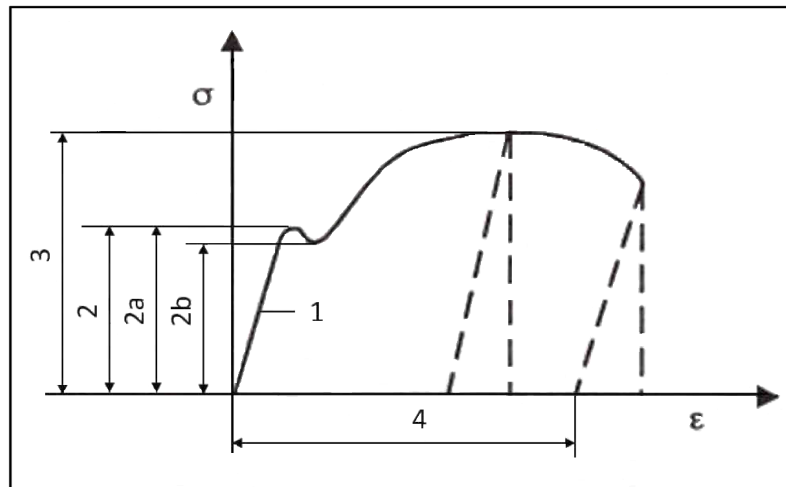
Das bestätigt die von Langenberg aufgestellte These, dass Abdrücke nach Baumann und Makroschliffe unverzichtbar sind. In den Unterlagen der European Convention for Constructional Steelworks (ECCS) wird eine deutlich vereinfachte Klassifizierungshilfe [79, S. 40] vorgestellt. Diese ist nach Ansicht des Verfassers nur ein erster Schritt zur Grobabschätzung und keinesfalls ein Ersatz für eine detaillierte metallurgische Untersuchung.

#### 4.3.3 Zugversuch

Um den Werkstoff identifizieren zu können, werden Streckgrenze  $f_y$  und Zugfestigkeit  $f_u$  benötigt. Im Sprachgebrauch der Werkstoffkunde wird von Streckgrenze  $R_e$  und Zugfestigkeit  $R_m$  gesprochen.

Diese Kennwerte des Grundwerkstoffes werden durch den Zugversuch nach DIN 50125 [80] ermittelt. Hierbei werden durch zerstörendes Prüfen die erforderlichen Werkstoffkennwerte festgestellt. Die Ergebnisse werden im Spannungs-Dehnungs-Diagramm festgehalten.

An nachfolgendem Diagramm (Abbildung 4.6 auf Seite 72) sind die folgenden charakteristischen Größen (Tabelle 4.1 auf Seite 73) abzulesen. Als Ergebnis dieser



**Abbildung 4.6:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit charakteristischen Größen beim Zugversuch für die Bewertung der Schweißeignung [81]

Untersuchung wird der vorliegende Werkstoff in eine Festigkeitsklasse wie zum Beispiel S355 eingeordnet.

Der im Bereich der Instandsetzung von Brücken vor 1960 zu erwartende vorherrschende Stahl wird der S235 sein, der als St 37 aus Thomasstahl häufig Verwendung fand. Einzelne Bauteile können aus S355 bzw. nach alter Konvention St 52 hergestellt worden sein.

Der S275 ist eine in Deutschland bislang unübliche Stahlsorte. Ebenso wenig ist die Verwendung von höherfestem Stahl S450 zu erwarten.

Alle Proben werden diesem Versuch unterzogen. Die exemplarische Auswertung für Probe G01 (Abbildung 4.7 auf Seite 74) ist nachfolgend dokumentiert.

Der in der Probe G01 untersuchte Altstahl würde nach den Ergebnissen des Zugversuches fast als S355 (vgl. Tabelle 4.2 auf Seite 73) einzuordnen sein.

#### 4.3.4 Kerbschlagbiegeversuch

Dieser Versuch findet im aktuellen Regelwerk insofern Anwendung, als seine Ergebnisse bei der Stahlsortenauswahl hinsichtlich der Bruchzähigkeit und der Eigenschaften in Dickenrichtung nach DIN EN 1993-1-10 [82] auszuwerten sind.

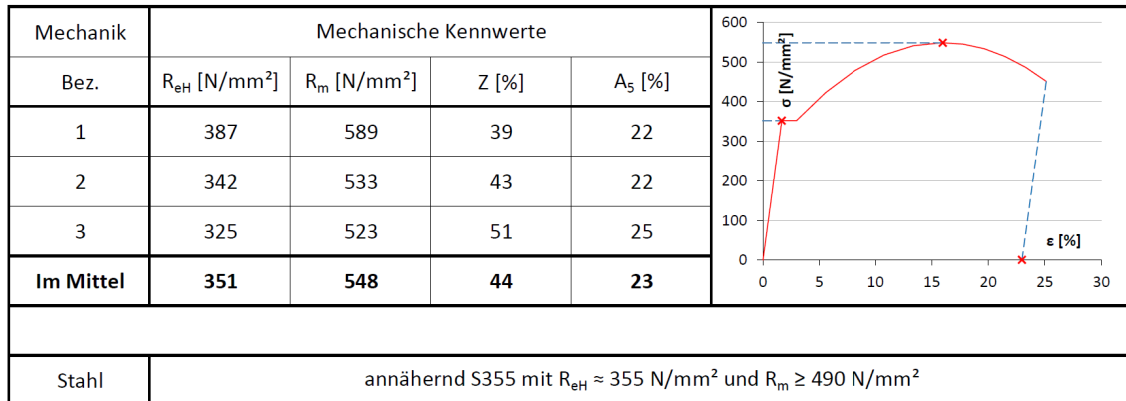
Nummer	Bezeichnung	Effekt
1	Elastizitätsmodul	elastisches Verhalten
2	Streckgrenze $R_e$ bzw. $f_{yk}$	erste plastische Verformung
2 a	obere Streckgrenze $R_{eH}$	plastische Verformung
2 b	untere Streckgrenze $R_{eL}$	plastische Verformung (Fließplateau)
3	Zugfestigkeit $R_m$ bzw. $f_{uk}$	Einschnüren der Probe und Bruch
4	Bruchdehnung A	Dehnung der Probe beim Bruch

**Tabelle 4.1:** Bezeichnung der charakteristischen Größen des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes

Stahlsorte	Streckgrenze $f_{yk}$ in N/mm <sup>2</sup> für Werkstoffdicken $\leq 40$ mm	Zugfestigkeit $f_{uk}$ in N/mm <sup>2</sup> für Werkstoffdicken $\leq 40$ mm
S235	235	360
S275	275	430
S355	355	490
S450	440	550

**Tabelle 4.2:** Streckgrenze  $f_{yk}$  und Zugfestigkeit  $f_{uk}$  nach DIN EN 1993-1-1 [63, S. 28] – Auszug aus Tabelle 3.1 der Norm

#### 4 Identifizierung der Altstähle



**Abbildung 4.7:** Mechanische Kennwerte des untersuchten Altstahls, Probe G01, Vergleich mit einem S355 nach [63], Auszug aus Anlage A.1

Für die Bemessung des Tragwerkes hinsichtlich der Tragsicherheit hat die Auswertung des Kerbschlagbiegeversuches im Rahmen einer gesonderten Bemessungskombination nach [82, S. 10] zu erfolgen. Diese lautet:

$$E_d = E \left\{ A[T_{Ed}] + \Sigma G_k + \psi_1 \cdot Q_{k,1} + \sum_{i=1}^n (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) \right\} \quad (4.1)$$

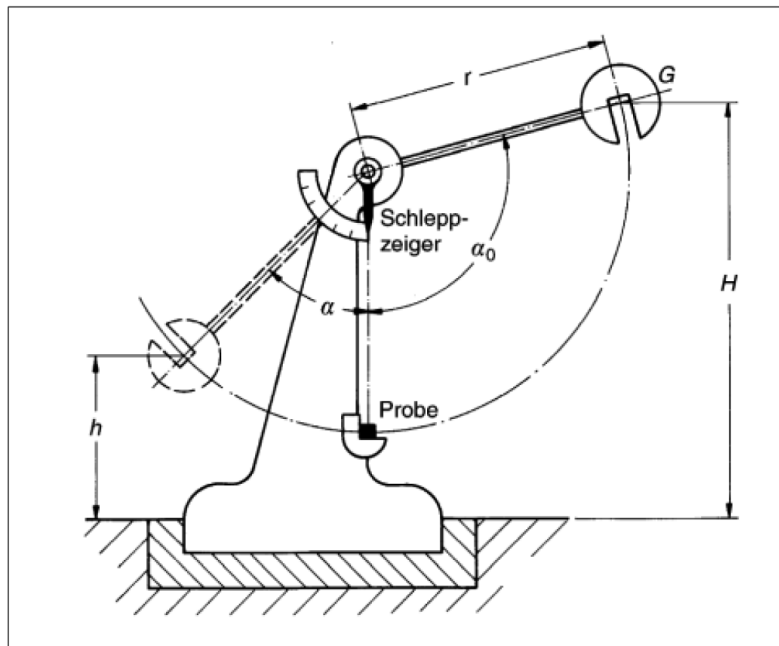
Hierbei ist die Temperatur  $T_{Ed}$  als Leiteinwirkung zu betrachten und die Kombinationsbeiwerte  $\psi_1$  und  $\psi_2$  sind nach DIN EN 1990 [83] anzunehmen. Das Zeichen + steht hier für eine Kombination, nicht streng für eine Addition.

Als Ergebnis Bemessungskombination wird eine Stahlsortenauswahl hinsichtlich der Kerbschlagarbeit getroffen. Die Sorten reichen von JR (Kerbschlagarbeit 27 Joule bei Raumtemperatur) über J0 (Kerbschlagarbeit 27 Joule bei 0 °C) bis hin zu J2 (Kerbschlagarbeit 27 Joule bei -20 °C). Andere Bezeichnungen für aktuelle Feinkornbaustähle werden hier nicht weiter betrachtet.

Darüber hinaus findet sich der Kerbschlagbiegeversuch nicht im Regelwerk des Eurocodes 3 wieder.

Der in DIN EN ISO 148-1 [84] genormte Kerbschlagbiegeversuch vergleicht die Energien, die vor und nach dem zerstörenden Prüfen einer Probe bei einer definierten Referenztemperatur vorliegen.

Eine einseitig gekerbte Probe – V-Kerb oder U-Kerb sind möglich – wird in einer Vorrichtung durch einen Pendelhammerschlag zerstört.



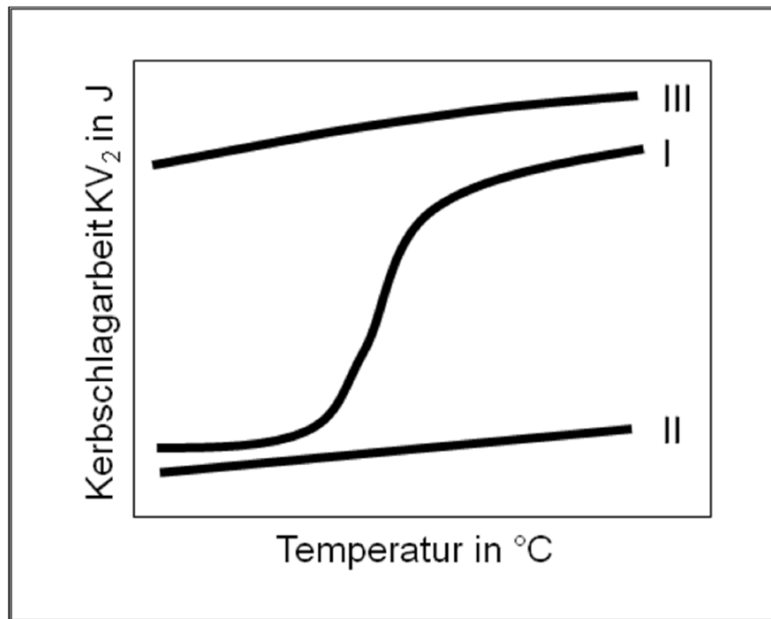
**Abbildung 4.8:** Anordnung und Durchführung des Kerbschlagbiegeversuchs nach [85, S. 281]

Vor dem Schlag beträgt die Energie des Hammers  $E_1 = G \cdot H$ , die Energie nach dem Schlag beläuft sich auf nur  $E_2 = G \cdot h$ . Die beim Zerschlagen der Probe verbrauchte Energie errechnet sich zu  $K = E_1 - E_2 = G \cdot (H - h)$ . Dieser Wert ist die Kerbschlagarbeit  $KV_2$ . Die Normalbedingungen des Versuches definieren eine Eingangsenergie von  $E_1 = 300 \pm 10 \text{ J}$ . Zur näheren Erläuterung des Aufbaues vgl. Abbildung 4.8 (S. 75).

Als weiteres Ergebnis kann die Kerbschlagzähigkeit  $a_k$  als Quotient von verbrauchter Kerbschlagarbeit und gefährdetem Querschnitt gebildet werden. Diese Werte sind gelegentlich in alten Liefervorschriften angegeben. Die Auswertung des Kerbschlagversuches über unterschiedliche Probertemperaturen und Werkstoffe zeichnet die in Abbildung 4.9 auf Seite 76 dargestellten charakteristischen Geometrien.

Kurve I in Abbildung 4.9 zeigt ausgeprägte Hoch- und Tieflagen. Bei tiefen Temperaturen ist die zur Zerstörung benötigte Kerbschlagarbeit gering, bei hohen Temperaturen dagegen sehr groß. In diese Kurve sind unlegierte Baustähle und legierte Stähle mit ferritisch-perlitischem Gefüge einzuordnen.

Kurve II zeigt bei allen Einsatztemperaturen eine geringe Kerbschlagarbeit. Dieser Werkstoff ist als spröde zu bezeichnen. Hierin sind lamellares Gusseisen,



**Abbildung 4.9:** Darstellung der Kerbschlagarbeit über der Temperatur der Probe, schematisch nach [85, S. 284]

hochfeste und martensitisch gehärtete Stähle zu subsumieren.

In diesen Bereich fallen aber auch gealterte Stähle, die nach einer Reck- oder Abschreckalterung an ertragbarer Kerbschlagarbeit verlieren.

Kurve III dagegen zeigt bei allen Temperaturen ausgezeichnete  $KV_2$ -Werte. Selbst bei tiefen Einsatztemperaturen agieren die Werkstoffe dieser Kurve unter Last ausgesprochen zäh. Sie werden kaltzähe Werkstoffe genannt. Hierin sind neben anderen Metallen auch austenitische Stähle einzuordnen.

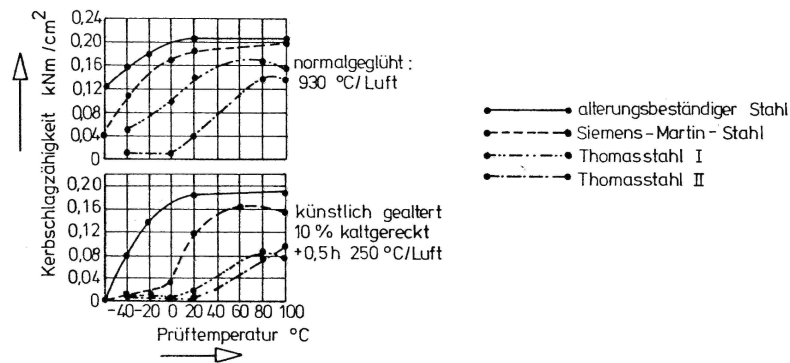
Als Ergebnis der Kerbschlagbiegeversuche kann zum Beispiel eine Aussage über vorangegangene Alterungsprozesse getroffen werden.

Die Probe G01 liefert im Kerbschlagbiegeversuch die in Abbildung 4.11 (S. 77) dokumentierten Ergebnisse.

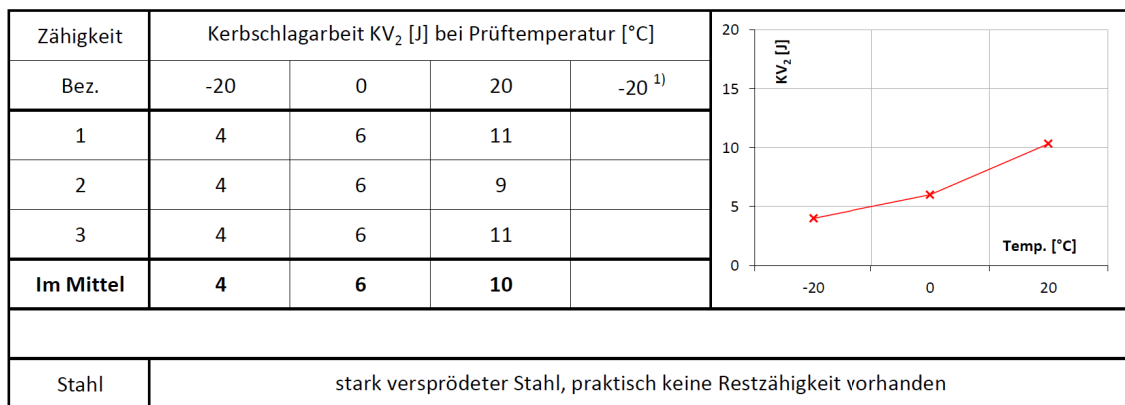
ROIK [86, S. 50] führt aus, dass Stähle unterschiedlicher Erschmelzungsverfahren unterschiedlich auf Alterung reagieren.

Die Kerbschlagzähigkeit  $a_k$  eines Stahles nach Siemens-Martin vermindert sich bei einer Prüftemperatur von 20 °C von 0,18 kNm/cm<sup>2</sup> auf 0,12 kNm/cm<sup>2</sup>. Für

### 4.3 Identifizierung anhand einer Schweißseignungsprüfung



**Abbildung 4.10:** Darstellung der Kerbschlagzähigkeit von ungealterten und künstlich gealterten Proben unterschiedlicher Stähle nach ROIK [86, S. 50]



**Abbildung 4.11:** Zähigkeitswerte des untersuchten Altstahls, Kerbschlagbiegeversuch Probe G01, Auszug aus Anlage A.1

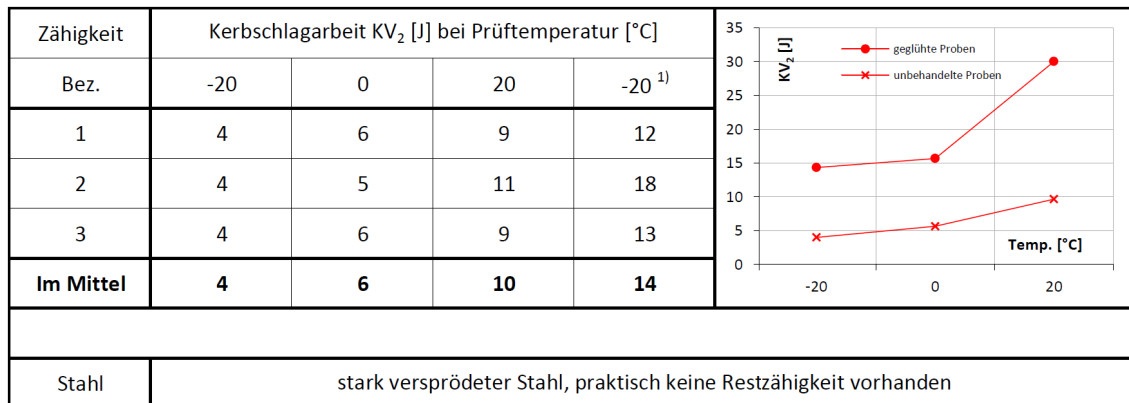
einen Thomasstahl minderer Güte (kein verbesserter Konverterstahl VK<sub>1</sub> oder VK<sub>2</sub>) sinkt  $a_k$  von 0,04 kNm/cm<sup>2</sup> auf 0,02 kNm/cm<sup>2</sup> ab.

Der Vergleich mit den Angaben von ROIK [86, S. 50] zeigt, dass die ermittelten Werte den angegebenen entsprechen. Bei Raumtemperatur (RT = 20 °C) liefern die Proben im Mittel eine Kerbschlagarbeit von rund 10,3 J. Bei einer Probenfläche von 0,80 cm<sup>2</sup> errechnet sich eine Kerbschlagzähigkeit von 12,9 J/cm<sup>2</sup>.

Bei Umrechnung in kNm/cm<sup>2</sup> sind das  $12,9/1.000 = 0,0129$  kNm/cm<sup>2</sup>. Dieser Wert entspricht dem von ROIK angegebenen Schätzwert für einen Thomasstahl II (vgl. Abbildung 4.10, S. 77).

Alle Proben sind unabhängig von der Prüftemperatur durch spröde, kristallin glänzende Bruchflächen gekennzeichnet. Die Probe G01 liefert bei keiner der Prüf-

#### 4 Identifizierung der Altstähle



**Abbildung 4.12:** Zähigkeitswerte des untersuchten Altstahls, Kerbschlagbiegeversuch Probe G03, Auszug aus Anlage A.7

Stahl	annähernd S355 mit $R_{eH} \approx 355 \text{ N/mm}^2$ und $R_m \approx 490 \text{ N/mm}^2$ - die Werte haben sich verbessert!				
1) Probe gegläht bei 1.000 °C       SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01	Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			Proben gegläht bei 1.000 °C
	Bez.	-20	0	20	
	1	12	21	30	
	2	18	15	23	
	3	13	11	37	
	Im Mittel	14	16	30	

**Abbildung 4.13:** Detaillierte Werte der geglähten Proben, Kerbschlagbiegeversuch Probe G03, Auszug aus Anlage A.6

temperaturen eine nach aktuellen Anforderungen ausreichende Kerbschlagarbeit. Selbst bei Raumtemperatur werden nur 11 J (maximaler Einzelwert) anstelle der für die Einordnung JR erforderlichen 27 J erreicht.

Im Rahmen einer Wärmebehandlung weiterer Proben stellt sich aber heraus, dass die stark herabgesetzte Kerbschlagarbeit angehoben werden kann. Die Proben werden dazu bei 1.000 °C gegläht. Es zeigt sich das in den Abbildungen 4.12 und 4.13 beschriebene Bild.

Damit wäre der bislang stark versprödete Stahl wieder als Stahl mit der Kerbschlagarbeit JR zu bezeichnen. Wie lange diese Veränderung vorhält, ist jedoch unklar.



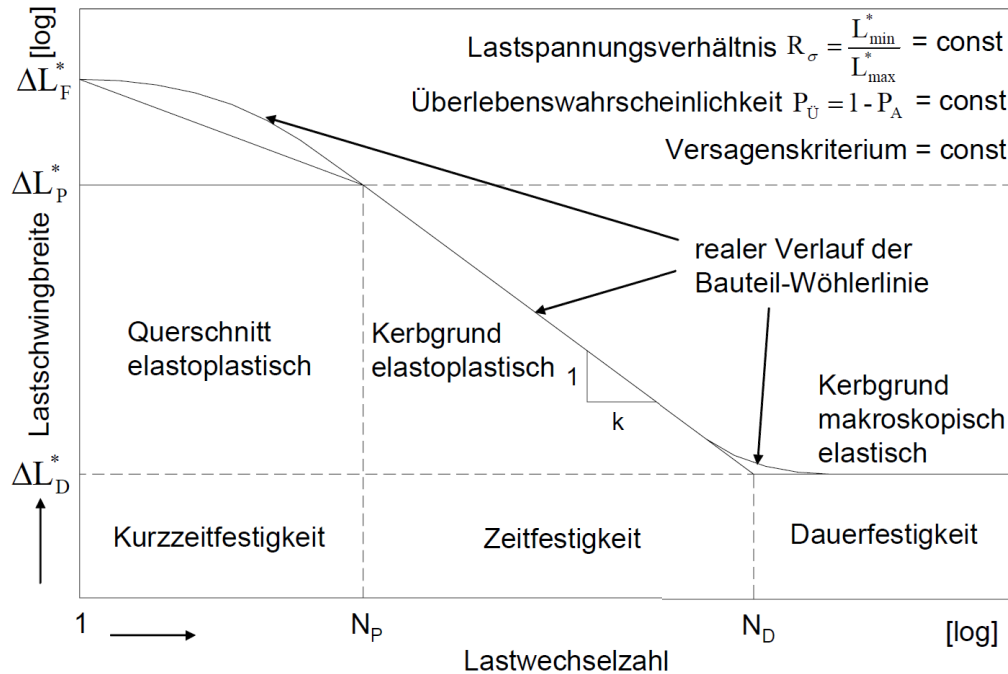
## 5 Ermüdungsfestigkeit

### 5.1 Grundlagen

„Häufige Lastwechsel führen zum Bruch unter niedrigerer Beanspruchung als bei einmaliger Belastung – Ermüdung (engl. fatigue), Dauerbruch“ [86, S. 57].

Im aktuellen Normwerk des Eurocodes 3 (EC 3) werden deshalb die Kerbfälle als Ermüdungsfestigkeitsklassen FAT bezeichnet. Die ersten systematischen Untersuchungen zu diesem Themenkomplex stammen von Wöhler und beginnen im Jahr 1858.

Den Zusammenhang zwischen Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeit hat RUDOLPH [87, S. 10] in Anlehnung an HAIBACH [88, S. 26] übersichtlich als Bauteil-Wöhlerlinie dargestellt. Die Darstellung erfolgt in der Regel als normierte Wöhlerlinie in doppellogarithmischer Form (Abbildung 5.1, S. 79).



**Abbildung 5.1:** Schematische Darstellung einer Bauteil-Wöhlerlinie nach [87, S. 10], hier mit der Schwingbreite  $\Delta L_P = \Delta \sigma$

Die Kurzzeitfestigkeit liegt im Bereich bis zu  $N_P = 10^4$  Lastwechseln. Von dieser Lastspielzahl an bis zu  $N_D = 5 \cdot 10^6$  Lastspielen wird der Bereich als Zeitfestigkeit bezeichnet. Bei einer höheren Lastspielzahl wird von Dauerfestigkeit gesprochen.

Die bisher auch im Stahlbau übliche Sicht, der dauerfeste Bereich beginne bei  $2 \cdot 10^6$  Lastspielen, wird durch die DIN EN 1993-1-9 (EC 3-1-9) [13] als Teil des EC 3 korrigiert.

Allerdings weist SONSINO [89] darauf hin, dass Dauerfestigkeit eine Fiktion sei, und ersetzt die Horizontale der Dauerfestigkeit im Wöhlerdiagramm durch eine flach fallende Gerade. Die Neigung dort wird mit  $n = 22$  angesetzt.<sup>1</sup> Diese Herangehensweise wird im Folgenden bei allen Versuchsauswertungen von Schwingversuchen benutzt. Das gewählte Vorgehen wird durch die Empfehlungen des INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING (IIW) abgesichert [90, S. 44].

Eine **statische** Last wird auf ein Bauwerk aufgebracht und verbleibt für eine lange Verweildauer dort. Hier ist klassisch die Eigenlast zu nennen, die immer wirkt. Aber auch die Schneelast, die unter Umständen über die gesamte Zeitdauer des Winters einwirkt, zählt dazu.

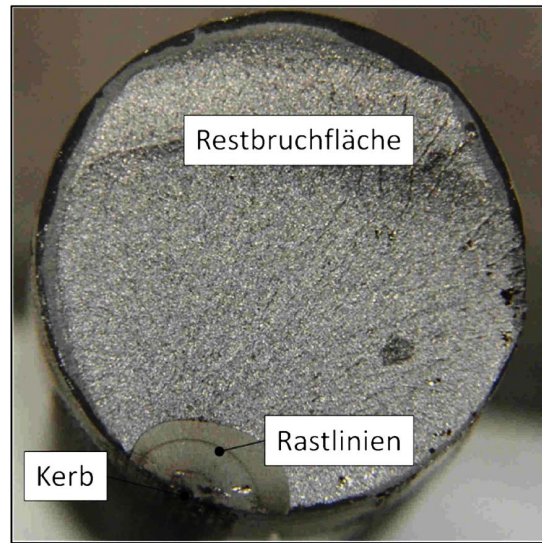
Eine **schwingende** Last wächst in kurzer Zeit zu voller Lastintensität an und sinkt in ebensolcher kurzer Zeit wieder von vollem Lastbetrag in die Ausgangslage ab (siehe hierzu auch Abschnitt 5.2, S. 81).

Als Ergebnis einer **schwingenden** Beanspruchung – auch als **nicht vorwiegend ruhend** bezeichnet – kommt es unter Umständen zu einem Ermüdungsbruch im Tragwerk. Ausgehend von einer Kerbe – damit ist tatsächlich eine Kerbe, ein kleiner Riss, eine Rostnarbe, aber eben auch eine Schweißraupe gemeint –, kommt es zu Dauerbrüchen. Diese wachsen sukzessive, kommen aber immer wieder zum Stillstand (Rastlinien). Wenn diese Risse weiter anwachsen, ist irgendwann der Punkt erreicht, an dem das noch vorhandene Grundmaterial die Beanspruchungen nicht mehr aufnehmen kann. Dann kommt es dort zum Restbruch, auch Gewaltbruch genannt. Das zeigen die Abbildungen 5.2 (S. 81) und 5.3 (S. 82).

- **Kerb:** äußerer Kerb durch mechanische Beschädigung des Materials, zum Beispiel Riss, Schweißnaht, Meißelschlag
- **Rastlinie:** Begrenzung einer verformungsarmen, glatten, sprödebruchartigen Teilbruchfläche

---

<sup>1</sup> Korrekterweise müsste hier  $n = -22$  stehen.



**Abbildung 5.2:** Ermüdungsbruchfläche eines schwingend belasteten Gewindebolzens, Probenmaterial der SLV Halle

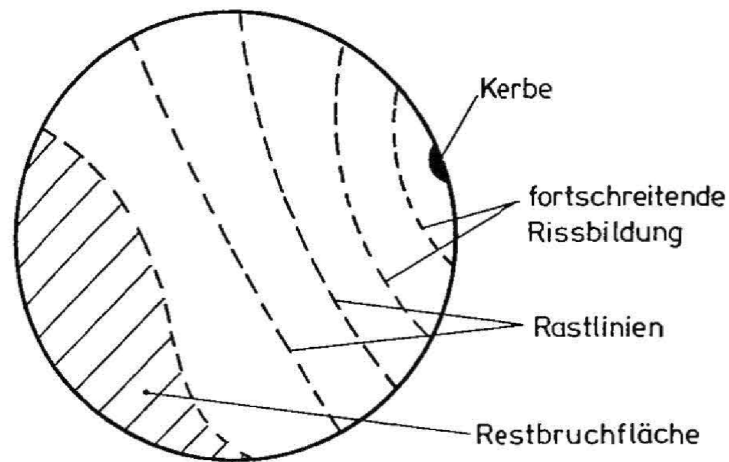
- **Restbruchfläche:** sprödebruchartige Bruchfläche ohne jede Rastlinie, schlagartiges verformungsloses Versagen

ROIK [86, S. 59] gibt an, dass der Beginn der Rissbildung bereits bei rund einem Drittel der Grenzlastspielzahl auftritt. Somit ist der Riss im Rahmen von Inspektionsintervallen detektierbar und es können geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um das Risswachstum zu stoppen oder den Riss wieder kraftschlüssig und betriebsfest zu verschließen.

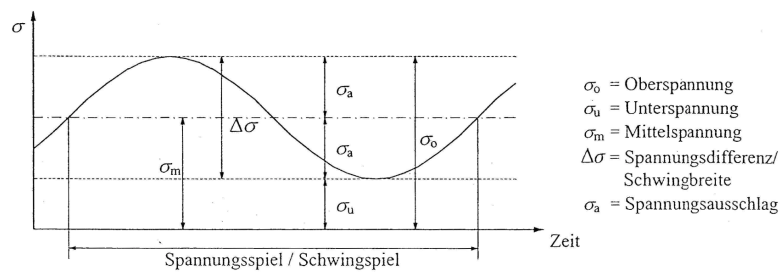
## 5.2 Begrifflichkeiten

Die wesentlichen Begrifflichkeiten sind in den nachfolgenden Grafiken visualisiert. Bei einer schwingenden Belastung wird es während eines Schwingspiels  $N$  eine maximale Spannung, die Oberspannung  $\sigma_o$ , und eine minimale Spannung, die Unterspannung  $\sigma_u$ , geben. Das arithmetische Mittel beider Werte bildet die Mittelspannung  $\sigma_m$ , die von Ober- und Unterspannung jeweils um den Spannungsausgleich (Amplitude)  $\sigma_a$  entfernt liegt. Das wird durch Abbildung 5.4 veranschaulicht.

Die Differenz zwischen Oberspannung und Unterspannung ist die Schwingbreite  $\Delta\sigma$ , die der doppelten Amplitude entspricht. Die Spannungen sind mit Vorzeichen



**Abbildung 5.3:** Ermüdungsbruchfläche eines Rundstahls nach [86, S. 59]



**Abbildung 5.4:** Beanspruchungsgrößen für periodische Beanspruchungen nach WAGENKNECHT [91, S. 302]

zu verwenden.

$$\text{Schwingbreite } \Delta\sigma = \sigma_o - \sigma_u \quad (5.1)$$

Je nach Größe und Vorzeichen – hier mit einer Druckspannung  $\sigma_{\text{Druck}} \leq 0$  – wird unterschieden zwischen

$$\text{einer Druckschwellbeanspruchung } \sigma_o \leq 0 \text{ und } \sigma_u < 0, \quad (5.2)$$

$$\text{einer Wechselbeanspruchung } \sigma_o > 0 \text{ und } \sigma_u < 0 \text{ und} \quad (5.3)$$

Bereich	Spannungs- verhältnis $R$	Spannungs- verhältnis $\kappa$
Druckschwellbereich	$+1 < R \leq \infty$	$0 < \kappa < +1$
Wechselbereich	$-\infty \leq R < 0$	$-1 < \kappa < 0$
Zugschwellbereich	$0 \leq R < +1$	$0 < \kappa < +1$

**Tabelle 5.1:** Übersicht über die Spannungsverhältnisse  $R$  und  $\kappa$

$$\text{einer Zugschwellbeanspruchung } \sigma_o > 0 \text{ und } \sigma_u \geq 0. \quad (5.4)$$

Als reine Wechselbeanspruchung wird  $\sigma_o = -\sigma_u$  verstanden, also eine Amplitude  $\sigma_a$  um die Nulllage herum. Als Hilfe, die Art der Beanspruchung einzuschätzen, wird das

$$\text{Spannungsverhältnis } R = \sigma_u / \sigma_o \text{ oder das} \quad (5.5)$$

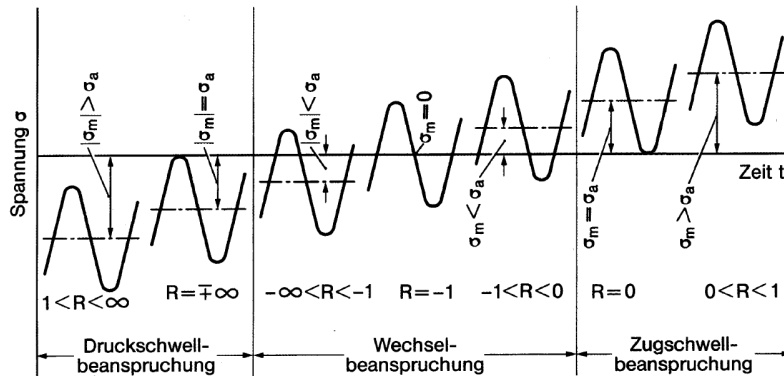
$$\text{Spannungsverhältnis } \kappa = \operatorname{sgn} \min |\sigma| / \operatorname{sgn} \max |\sigma| \quad (5.6)$$

benutzt. Hierbei sind die Spannungen mit Vorzeichen zu betrachten. Die genannten Spannungsverhältnisse kennzeichnen die Bereiche wie folgt:

Diese Zusammenhänge sind übersichtlich in einer von RADAJ und VORMWALD [92, S. 17] veröffentlichten Grafik (Abbildung 5.5 auf S. 84) zusammengestellt.

In den Vorschriften der Bahn für den Neubau, jetzt die RIL 804 [15], davor die DS 804 [22] und davor die DV 804 von 10/1951 [93], und für die Nachrechnung, die RIL 805 [3], sind für die beschriebenen Spannungsverhältnisse  $R$ -Werte für die Schwingbreiten  $\Delta\sigma$  angegeben. Diese Vorschriften sind mittelspannungsabhängig. Auch die Vorschriften der Deutschen Reichsbahn, die DV 848 [94] von 09/1981, sind mittelspannungsabhängig formuliert.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> In diesen Vorschriften werden nicht explizit die Schwingbreiten angegeben, diese lassen sich aber aus den angegebenen zulässigen Spannungen berechnen.



**Abbildung 5.5:** Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Spannungsverhältnis nach [92, S. 17]

Im jetzt vorliegenden EC 3, dort im Teil 1-9 [13], wird die Ermüdungsfestigkeit jedoch nicht an die Mittelspannung gekoppelt. Diese Erkenntnis wird in den Unterlagen der EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK (ECCS) [95, S. 21] dokumentiert:

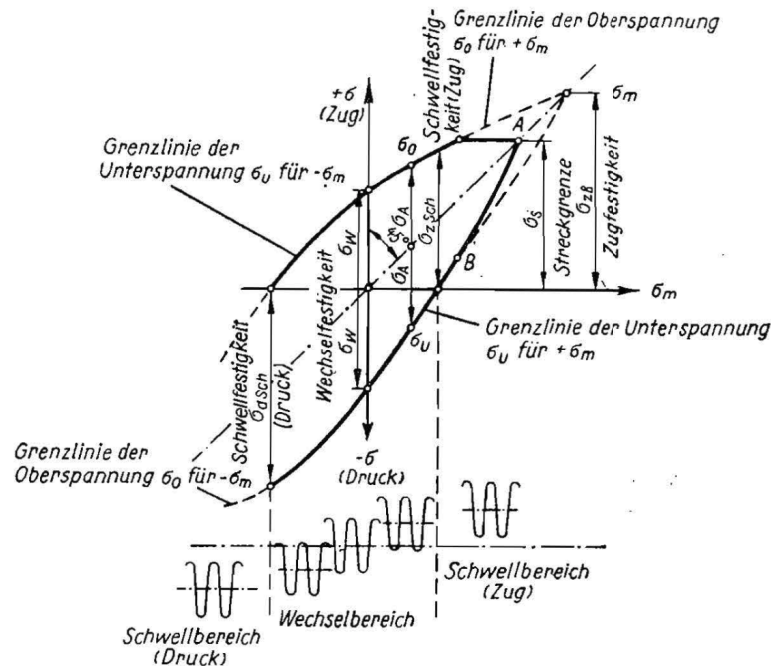
**“For welded details, the influence of the stress ratio,  $R$  (...), on fatigue life is thus of no importance, apart from (...) methods.”**

Damit reiht sich diese Vorschrift in einige Berechnungsnormen für nicht vorwiegend ruhend beanspruchte Tragwerke ein, in denen nicht auf die Mittelspannung abgehoben wird. Dazu zählen aus dem deutschen Normenbereich auch die DIN 4131 [96] für Antennentragwerke aus Stahl und die DIN 4133 [97] für Stahlschornsteine. Beide Normen sind zwischenzeitlich im EC 3 aufgegangen.

GEISSLER [98, S. 871] schreibt dazu, dass die Ermüdungsfestigkeitskurven für geschweißte Konstruktionen als mittelspannungsunabhängig angesehen werden, da aufgrund der – bei großen Bauteilen hohen – Schweißeigenspannungen eine Bestimmung der Mittelspannung nicht möglich sei. Deshalb ist ingenieurmäßig vom ungünstigsten Fall auszugehen. Das sei der Zugschwellbereich mit einem Spannungsverhältnis von  $R = \pm 0,00$ .

Die unterschiedlichen Werte für  $R$  können durch ein Smith-Diagramm miteinander verglichen bzw. ineinander überführt werden. Davon wird im Zuge dieser Arbeit bei den Auswertungen Gebrauch gemacht.

TAUSCHER [99, S. 29] beschreibt ausführlich die Eigenschaften des Smith-Diagramms (Abbildung 5.6, S. 85). Insbesondere wird dort erläutert, dass die



**Abbildung 5.6:** Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith (Schleifendiagramm) bei Zug-Druck-Dauerbeanspruchung, entnommen aus [99, S. 29]

Diagrammbereiche oberhalb der Streckgrenze nicht betrachtet werden, da bleibende Formänderungen (plastische Verformungen) im Dauerfestigkeitsbereich nicht auftreten dürfen.

Tabelle 5.2 für die FAT-Klasse 112 mit der dazugehörigen Abbildung 5.7 (beide auf S. 86) zeigt, dass die Ermüdungsfestigkeit im Bereich von  $-1,00 \leq R \leq \pm 0,00$  nach DS 804 [22] mindestens 20% günstiger - im Sinne einer größeren Schwingbreite - ist als die nach EC 3 [13]. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit kann das bestätigt werden (siehe hierzu die Anlage A.8: Datenblätter der Probe G03-03, S. 178 ff.).

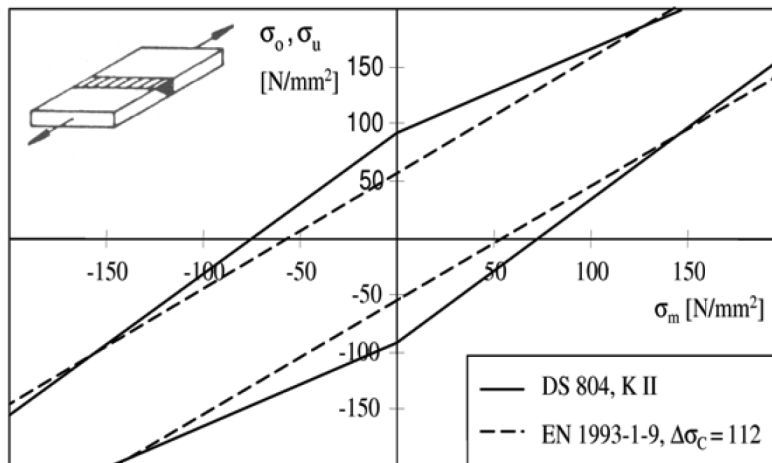
Erst bei  $R = +0,36 \approx +0,40$  gleichen sich die Werte, darüber werden die Bahnvorschriften ungünstiger. Hier wird die Stumpfnaht in Sondergüte, blecheben in Krafrichtung beschliffen, beschrieben. Nach EC 3 ist das die FAT 112.

Der EC 3 setzt für geschweißte Bauteile bei Normalspannungen die standardisierte Ermüdungsfestigkeitskurve (normierte Wöhlerlinie) an. Die Neigung der Wöhlerlinie beträgt  $m = 3$  (siehe hierzu Abbildung 5.8, S. 87).<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Korrekterweise müsste hier  $m = -3$  stehen.

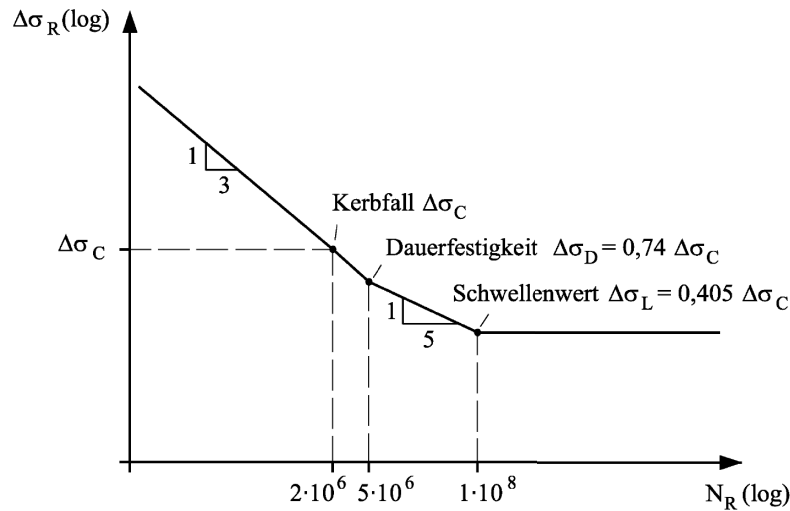
Spannungs- verhältnis R bzw. $\kappa$	DS 804 $\Delta\sigma_{KII}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	EC 3 $\Delta\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Vergleich $\Delta\sigma_{KII} / \Delta\sigma_c$ [%]
-1,00	183	112	163
-0,50	163	112	146
$\pm 0,00$	137	112	122
+0,40	109	112	97
+0,50	103	112	92
+0,90	33	112	29

**Tabelle 5.2:** Vergleich der Spannungsschwingbreiten nach DS 804 mit dem EC 3



**Abbildung 5.7:** Vergleich der Spannungsschwingbreiten nach DS 804 und EC 3, entnommen aus [19, S. 448]





**Abbildung 5.8:** Normierte Wöhlerlinie für Normalspannungen nach NUSSBAUMER [19, S. 420]

Im Zuge dieser Arbeit werden Proben mit einem Spannungsverhältnis  $R = 0,10$  – unterer Teil des Zugschwellbereiches – für Kleinproben untersucht und auf  $R = 0,50$  für Großproben mit einem hohen Maß an Eigenspannungen umgerechnet. Das erfolgt durch das Smith-Diagramm [99].

Das entspricht den Angaben von FISHER, FRANK und HIRT [100] sowie denen des INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING (IIW) in [90, S. 81] und in [101, S. 79].

KASSNER erläutert in [102, S. 56], dass die IIW-Empfehlungen in die Regelungen der DIN EN 1993-1-9 eingeflossen sind. Die IIW-Empfehlungen selbst sind mittelspannungsunabhängig für ein Spannungsverhältnis von  $R = 0,50$  formuliert worden.

In der Fachwelt sind allerdings Veröffentlichungen bekannt, die auch für geschweißte Verbindungen eine Mittelspannungsabhängigkeit formulieren [103] [104]. Gleichlautend äußert sich KÜHN [105] in einer E-Mail-Korrespondenz zu dem Sachverhalt der Mittelspannungsabhängigkeit.

Nach dem Wortlaut des EC 3 sind die Schwingbreiten unabhängig von der Mittelspannung. Daher wären die mit dem Spannungsverhältnis  $R = 0,10$  gewonnenen Schwingbreiten direkt ohne Abminderung anzusetzen.

Nach den Erkenntnissen jedoch, die KASSNER [102] vorstellt, wären die bei  $R = 0,10$  gewonnenen Schwingbreiten auf das Spannungsverhältnis von  $R = 0,50$

umzurechnen.

Ganz offensichtlich ist die Fachwelt hinsichtlich der Mittelspannungsabhängigkeit nicht gänzlich im Konsens.

KÜHN [105] resümiert jedoch, „**dass die Absicherung der Kerbfälle im Eurocode nach strengen statistischen Kriterien erfolgt ist, bei der die Gesamtheit der zu jedem Detail zur Verfügung stehenden Versuchsdaten zu einer Grundgesamtheit zusammengefasst und ausgewertet wurde. Da hier Versuche ganz verschiedener Quellen und auch verschiedener Institute mit verschiedenen Untersuchungsprogrammen zusammengefasst wurden, bei denen i. d. R. auch immer verschiedene Mittelspannungen aus äußeren Lasten vorlagen, ist der Einfluss der tatsächlichen Mittelspannungen einschließlich des Effekts der Eigenspannung a priori in den Kerbfallbestimmungen mit enthalten und sicher mit abgedeckt.**“

Hierzu haben HIRT, RYAN, SEDLACEK und SMITH die Background Documentation Eurocode 3, Chapter 9, veröffentlicht [106].

Teilweise im Vorgriff auf die Ergebnisse sei darauf verwiesen, dass die Probe G03 in ihren Ausprägungen aufzeigt, dass die unmittelbar aus dem Versuch gewonnenen Werte überwiegend oberhalb der Werte des EC 3 liegen.

Diese Ergebnisse, die bei FAT 160, FAT 112, FAT 90, FAT 71 und FAT 36 direkt mit  $R = 0,10$  ermittelt werden, liegen bei nahezu allen FAT-Klassen deutlich über den Werten des EC 3. Lediglich die Werte für die FAT 90 bleiben bei  $R = 0,10$  mit  $86 \text{ N/mm}^2$  knapp unterhalb der normativen Grenzen.

Nach Umrechnung in das Spannungsverhältnis  $R = 0,50$  sind die Werte bis auf die FAT 90 nahezu deckungsgleich mit den Angaben des EC 3 (siehe hierzu die Tabelle 5.3, S. 89).

Interessanterweise wird die Stumpfnah Normalgüte (FAT 90) mit schlechteren Werten gemessen als die Stumpfnah einseitig (FAT 71). Da alle anderen FAT-Klassen die Anforderungen des EC 3 erfüllen, lässt das möglicherweise darauf schließen, dass bei der FAT 90 ein Problem bei der Sorgfalt mindestens einer Schweißung vorliegt (Fertigungsproblem).

Nach Meinung des Verfassers hätte die Schwingbreite der FAT 90 bei rund  $120 \text{ N/mm}^2$  liegen müssen. Da bei der geringen Anzahl der Proben schon eine fehlerhafte oder imperfekte Schweißung das Ergebnis der statistischen Untersuchungen entscheidend verändern kann, wird Folgendes unterstellt:

Probe	Art	FAT nach nach EC 3 [N/mm <sup>2</sup> ]	FAT bei R = 0,10 [N/mm <sup>2</sup> ]	FAT bei R = 0,50 [N/mm <sup>2</sup> ]
G03-01	Grundwerkstoff ohne Wärme	160	224,8	155,0
G03-02	Grundwerkstoff mit Wärme	160	228,7	160,3
G03-03	Stumpfnahht Sondergüte	112	147,9	114,1
G03-04	Stumpfnahht Normalgüte	90	86,0	73,3
G03-05	Stumpfnahht ein- seitig	71	108,7	89,2
G03-06	Kreuzstoß	36	55,6	50,0

**Tabelle 5.3:** Übersicht über die Ergebnisse der Probe G03 mit Messwerten  $R = 0,10$  und umgerechneten Werten  $R = 0,50$

Die Proben der FAT 90 haben die geforderten Werte des EC 3 nicht erreicht. Aufgrund der geringen Probenanzahl und des Einflusses auf die Auswertung wird unterstellt, dass es sich hierbei um einen Ausreißer handelt.

Wenn diese Werte jedoch konservativ bewertet werden, was den grundsätzlichen Gedanken der Ingenieure entspricht, wird die FAT 90 bei einem Spannungsverhältnis von  $R = 0,50$  der Gesamtbetrachtung zugrunde gelegt.

Die FAT 90 ist bei Umrechnung auf  $R = 0,50$  bei einer FAT 90 mit nur 73 N/mm<sup>2</sup> errechnet worden. Es errechnet sich ein prozentualer Verlust von  $1 - 73,39/90,00 = 18,5\%$ . Grundsätzlich könnte also so vorgegangen werden, dass die FAT 90 als FAT 71 bewertet würde (Verschieben in die nächsttiefere FAT-Klasse).

Insgesamt würde das Verschieben in die nächsttieferen FAT-Klassen für alle Kerbfälle in Betracht kommen und eine zusätzliche Sicherheit gegen die Unwägbarkeiten einer möglichen Baustellenschweißung bieten.

### 5.3 Versuche

Die Versuche sind von der Schwierigkeit geprägt, geeignetes Probenmaterial zu beschaffen, zumal für eine ausführliche Untersuchung an einem Bauwerk in situ die Einschränkung besteht, dass das Bauwerk nach der Probenentnahme noch nutzbar sein muss. Es kann also nur eine verhältnismäßig geringe Anzahl von Proben entnommen werden.

Idealerweise sind Versuche in den Klassen FAT 160 (Grundwerkstoff, ungeschweißt), FAT 112 (Vollnaht in Sondergüte, beidseitige Schweißung, blecheben in Krafrichtung beschliffen, ZFP), FAT 90 (Vollnaht mit < 10% Nahtüberhöhung, beidseitige Schweißung, ZFP), FAT 71 (Vollnaht, einseitige Schweißung, ZFP) und FAT 36 (T-Stoß mit Kehlnähten an Zwischenblech) durchzuführen.

Weiterhin wird der Einfluss der Wärmeeinflusszone (WEZ) untersucht, indem eine Längsraupe aufgeschweißt, wieder entfernt und die Schweißstelle beschliffen wird. Somit wird über die gesamte Breite der Möglichkeiten geprüft (siehe hierzu die Tabellen 5.4, S. 91, und 5.5, S. 92).

Diese Versuche sind mit Stählen unterschiedlicher Erschmelzung durchzuführen. Vor allem die alterungsempfindlichen Thomas- und Bessemerstähle sind zu untersuchen, aber auch die hinsichtlich der Alterung unkritischen Siemens-Martin-Stähle sind zu beleuchten.

Das gilt für den Anschluss im Rahmen einer Reparatur (Verschweißen von gleichartigen alten Stählen) und für den Anschluss von altem zu neuem Stahl (Verschweißen im Rahmen eines Teilaustausches).

Der letzte angesprochene Punkt wird nicht untersucht, da offensichtlich ist, dass im Rahmen einer Alt-zu-Neu-Verbindung der Altstahl der kritische Punkt ist.

Die Schweißungen werden von den Lehrschweißern der SLV Halle vorgenommen und in den dortigen Laboren durch zerstörungsfreie Prüfung (ZFP) auf Fehlerfreiheit untersucht. Anschließend werden die Proben in Prüfständen dauergeschwungen (siehe hierzu Anlage A.25 auf S. 251 ff.).

#### 5.3.1 Versuchsauswertung

Die gewonnenen Proben werden hinsichtlich ihrer Dauerfestigkeit ausgewertet und in normierten Wöhlerlinien aufgetragen. Die Auswertung erfolgt im

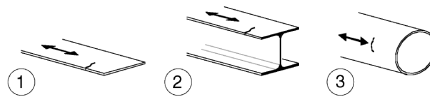
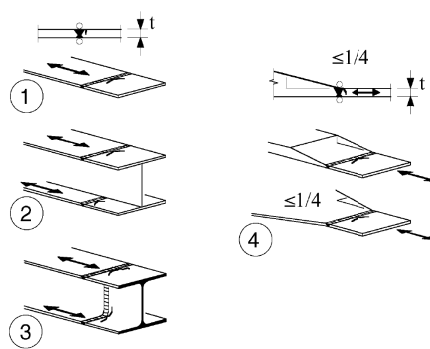
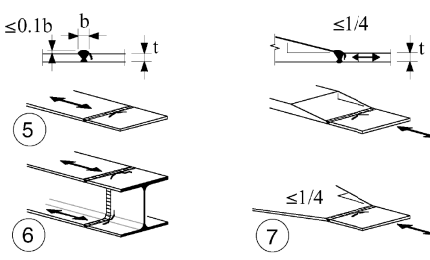
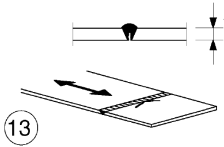
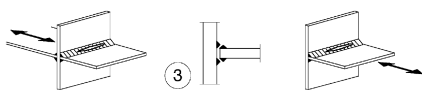
Kerbfall	Detail und Beschreibung	Anforderung
FAT 160 Tab. 8.1 EC 3-1-9	<p>ANMERKUNG Der Kerbfall 160 ist der höchst mögliche; kein Kerbfall kann bei irgendeiner Anzahl an Spannungsschwingspielen eine höhere Ermüdungsfestigkeit erreichen.</p>  <p>1. Bleche und Flachstähle mit gewalzten Kanten</p>	Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang ist herzustellen.
FAT 112 Tab. 8.3 EC 3-1-9	 <p>1. Querstöße in Blechen und Flachstählen (ohne Schweißbadsicherung)</p>	Alle Nähte blecheben in Lastrichtung beschliffen, Schweißnahtanlauf- und Schweißnahtauslaufbleche sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. Beidseitige Schweißung mit ZFP.
FAT 90 Tab. 8.3 EC 3-1-9	 <p>5. Querstöße von Blechen oder Flachstählen (ohne Schweißbadsicherung)</p>	Die Nahtüberhöhung muss $\leq 10\%$ der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden, Schweißnahtanlauf- und Schweißnahtauslaufbleche sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. Beidseitige Schweißung mit ZFP, die Schweißnähte sind in Wannenlage zu schweißen.

Tabelle 5.4: Untersuchte FAT-Klassen nach EC 3-1-9 (Teil 1) [13]

Kerbfall	Detail und Beschreibung	Anforderung
FAT 71 Tab. 8.3 EC 3-1-9	 <p>13. Einseitig geschweißte Stumpfnähte mit Inspektion der Wurzel durch ZFP</p>	Ohne Schweißbadsicherung.
FAT 36 Tab. 8.5 EC 3-1-9	 <p>3. Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten T-Stößen oder Kehlnähten oder in T-Stößen nach Bild 4.6 in EN 1993-1-8:2005</p>	Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muss $\leq 15\%$ des Zwischenblechs sein, Zwischenblech hier aus Neumaterial.

**Tabelle 5.5:** Untersuchte FAT-Klassen nach EC 3-1-9 (Teil 2) [13]

Perlschnurverfahren. Dieses benötigt im Gegensatz zum Horizonte- und Treppenstufenverfahren deutlich weniger Proben und ist damit für Bauwerke in situ vorrangig zu verwenden. Darüber hinaus liegen die Ergebnisse schneller vor. Dieses Vorgehen wird durch MARTIN, HINKELMANN und ESDERTS [107, S. 502] [108, S. 513] statistisch bestätigt.

Für jede untersuchte Konfiguration wird das Spannungsverhältnis  $R$  – oder auch  $\kappa$  – konstant gehalten, es liegen aber unterschiedliche Oberspannungen  $\sigma_{oben,i}$  an. Die untersuchten Proben werden bis zum Bruch oder bis zum Erreichen der Grenze von  $10^7$  Lastspielen beansprucht. Es ergeben sich Punkte in der Darstellung der Oberspannungen  $\sigma_{oben,i}$ , die die Bruchereignisse in Abhängigkeit von der Schwingspielzahl  $N_{B,i}$  darstellen. Diese werden im Doppellogarithmischen bis auf den geschätzten Abknickpunkt der ebenfalls geschätzten Zeitfestigkeitsgerade verschoben.

Für die Probe G01-01 (Kettenglied Schleusenkette / ungeschweißt / FAT 160, Anlage A.1, S. 143 ff.) ergeben sich im Dauerschwingversuch die in Abbildung 5.9 (S. 93) dargestellten Wertepaare aus Schwingspiel und Schwingbreite.

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis		R =	0,10
	Grundmaterial, unbehandelt, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie		m =	7,31
			Abknickpunkt bei		N <sub>B</sub> =	2,50E+06
Bez.	Ober- spannung σ <sub>oben</sub> [N/mm²]	Mittel- spannung σ <sub>mitte</sub> [N/mm²]	Unter- spannung σ <sub>unten</sub> [N/mm²]	Spannungs- amplitude σ <sub>ampl.</sub> [N/mm²]	Schwingbreite Δσ [N/mm²]	Schwingspiele N [-]
1	274,4	150,9	27,4	123,5	247,0	1.350.999
2	333,3	183,3	33,3	150,0	300,0	1.086.168
3	353,7	194,5	35,4	159,2	318,3	415.979
4	342,8	188,5	34,3	154,3	308,5	824.019
5	282,0	155,1	28,2	126,9	253,8	1.092.553
6	257,7	141,7	25,8	116,0	231,9	10.000.000
7	270,9	149,0	27,1	121,9	243,8	10.000.000
8	297,0	163,4	29,7	133,7	267,3	2.207.250

**Abbildung 5.9:** Ergebnis der Schwingversuche, Probe G01-01, Wöhlerlinienneigung berechnet wie beschrieben, Auszug aus Anlage A.1

Es sind

- m: die Neigung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich dieser Wert muss zunächst geschätzt und dann angepasst werden,
- σ<sub>oben,i</sub>: die gemessene Oberspannung beim Bruch der Probe i und
- N<sub>B,i</sub>: die Anzahl der Lastspiele beim Bruch der Probe i.

Es gilt Gleichheit:

$$\left(\sigma_{\text{oben},i}\right)^m \cdot N_{B,i} = \left(\sigma_{\text{oben},i \text{ bei } 2 \cdot 10^6}\right)^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad (5.7)$$

Somit errechnet sich die Oberspannung bei  $N = 2 \cdot 10^6$  zu:

$$\sigma_{\text{oben},i \text{ bei } 2 \cdot 10^6} = \left[ \left(\sigma_{\text{oben},i}\right)^m \cdot \frac{N_{B,i}}{2 \cdot 10^6} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (5.8)$$

Aus diesen verschobenen Oberspannungen werden der Mittelwert und die Streuung der Spannungen  $T_S$  errechnet, die zwischen einer Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_{\bar{U}} = 90\%$  und  $P_{\bar{U}} = 10\%$  liegt. Es wird nach KRANZ, anschaulich gesprochen, eine „vertikale“ Standardabweichung bestimmt [109, S. 78]. Anschließend wird die Spannungsstreuung  $T_S$  minimiert. Das verändert die Neigung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich.

Die Abbildung 5.10 auf S. 95 dient der prinzipiellen Verdeutlichung dieses Vorgehens.

Mit dieser Methode können auch Auswertungen für vorgegebene Wöhlerlinienneigungen vorgenommen werden. In der Auswertung der Schwingbreiten ist das für den EC 3 erfolgt.

Die Lage des Abknickpunktes wird so eingestellt, dass die weiterführende Wöhlerlinie den oberen Durchläufer annähernd trifft. Dadurch wird die Forderung von MARTIN, HINKELMANN und ESDERTS [108, S. 516] entkräftet, dass für die Standardabweichung ein Freiheitsgrad von  $n - 2$  anzunehmen sei.

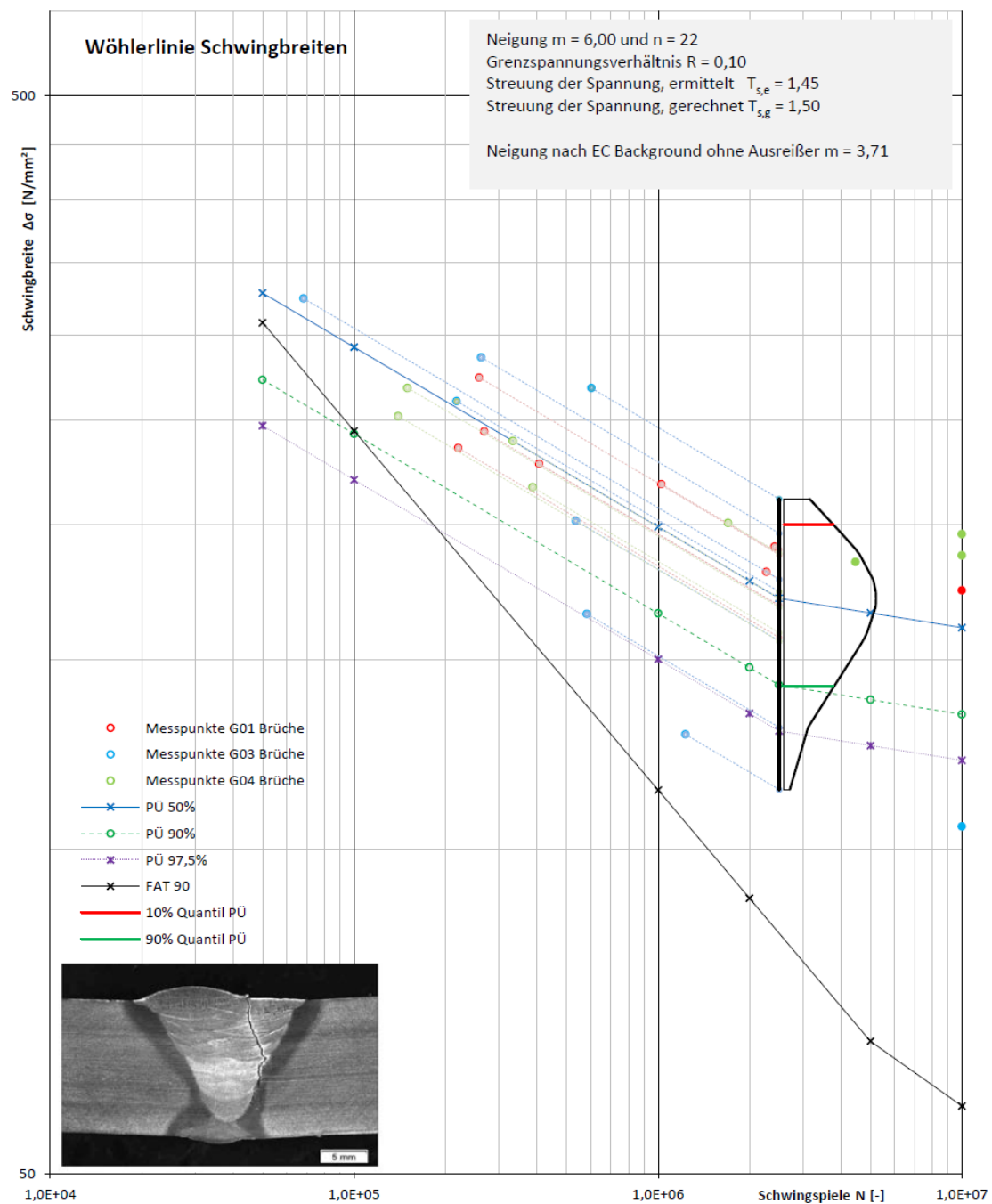
NUSSBAUMER und GÜNTHER [19, S. 422] schreiben hierzu sinngemäß, dass die Festlegung nicht immer nur das Ergebnis einer mathematisch-statistischen Auswertung sei, sondern dass ingenieurmäßiger Sachverstand bei der Auswertung der Proben zu walten habe.

Um eine **zusätzliche Sicherheit** einzubauen, wird nach HAIBACH [88, S. 223] eine künstliche Aufweitung der **Spannungsstreuung auf  $T_S = 1,50$**  vorgenommen. „Damit sind Eigenspannungen in extremer Höhe gemäß dem  $\Delta\sigma$ -Konzept berücksichtigt.“ Mit diesem modifizierten Wert wird eine Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_{\bar{U}} = 97,5\%$  angestrebt. Das entspricht nach HAIBACH [88, S. 223] und nach NUSSBAUMER und GÜNTHER [19, S. 421] genau genug einer Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_{\bar{U}} = 95\%$  bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 75% (siehe hierzu Abbildung 5.11 auf S. 96). Weitere Informationen zur Statistik liefern die Standards des DIN [110] und der ISO [111].

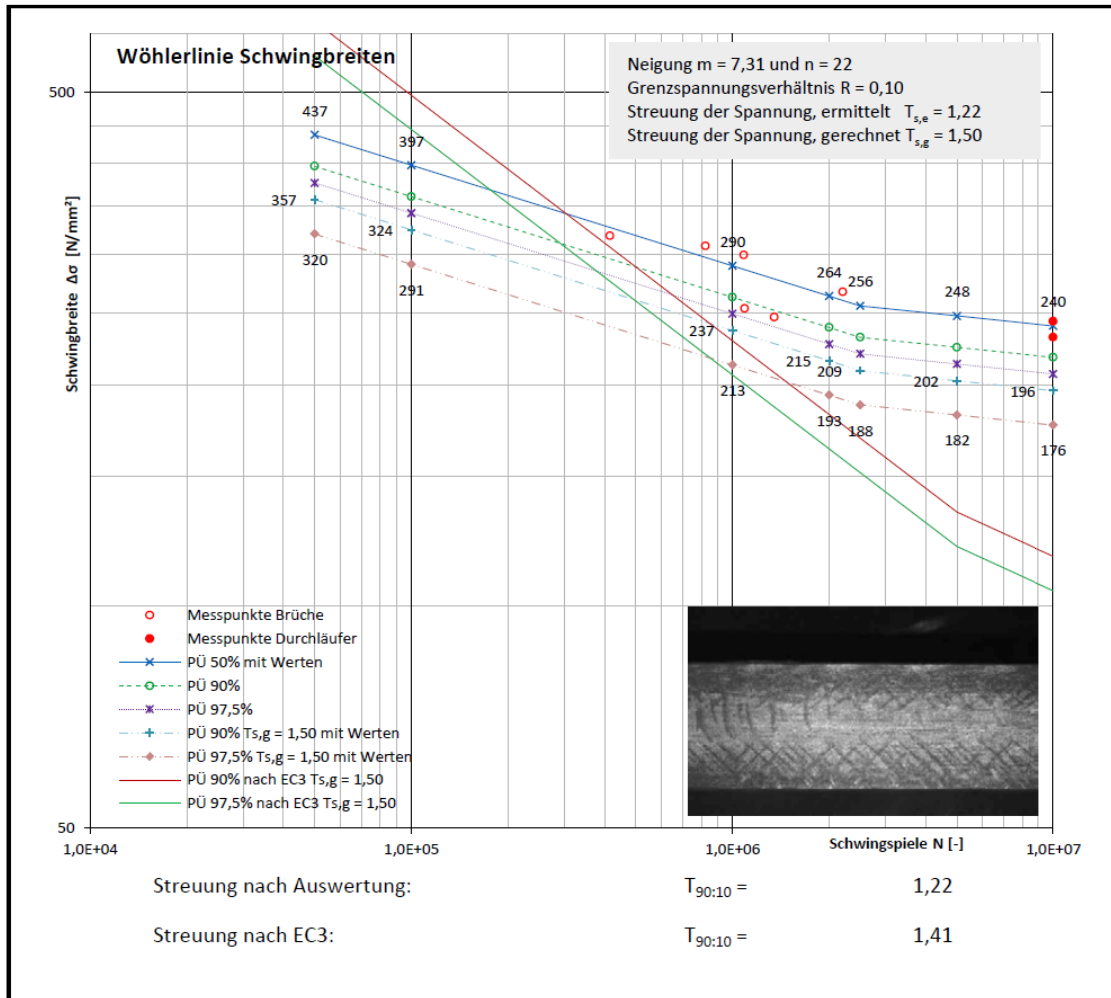
Das Aufweiten der Spannungsstreuung für kleine Proben, laborübliche Probengrößen, auf  $T_S = 1,50$  wird im Wöhlerlinienkatalog von OLIVIER und RITTER [112, S. 14] beschrieben, auch HOBACHER [113] hebt darauf ab.

Der ermittelte Wert ist laut EC 3 unmittelbar als Schwingbreite anzusetzen. Im hier vorliegenden speziellen Fall des ungeschweißten Grundmaterials der Probe G01-01 liegt der ermittelte Wert weit im sicheren Bereich [98, S. 871].

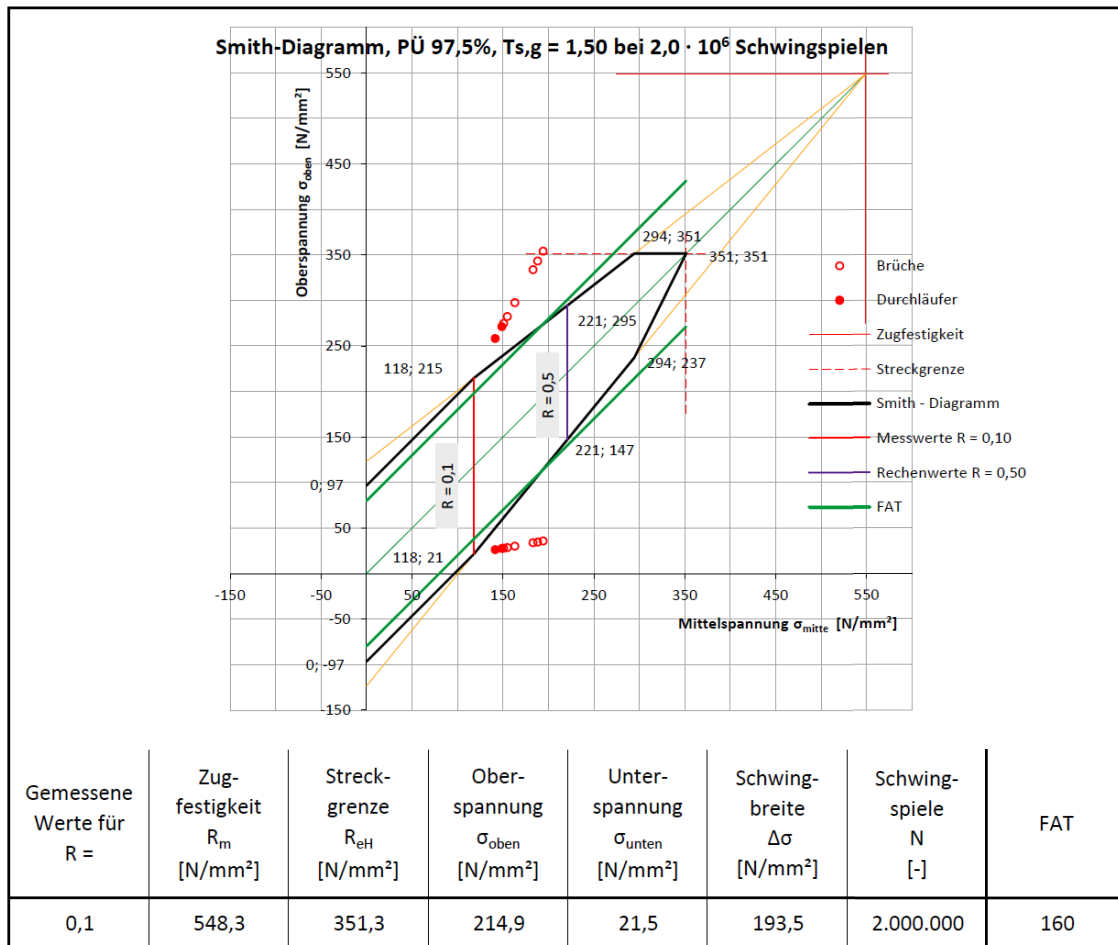




**Abbildung 5.10:** Schwingversuch der Proben G01-04, G03-04 und G04-04, Wöhlerlinienneigung  $m = 6,00$ , Abknickpunkt bei  $2,5 \cdot 10^6$  Lastwechseln, errechnete Streuung  $T_{90:10} = 1,45$ , Schwingbreite 130 N/mm<sup>2</sup>



**Abbildung 5.11:** Schwingversuch Probe G01-01, Wöhlerlinienneigung  $m = 7,31$ , Abknickpunkt bei  $2,5 \cdot 10^6$  Lastwechseln, errechnete Streuung  $T_{90:10} = 1,22$ , Schwingbreite  $193 \text{ N/mm}^2$ , Auszug aus Anlage A.1



**Abbildung 5.12:** Schwingversuch Probe G01-01, Smith-Diagramm, Schwingbreite 193 N/mm², Auszug aus Anlage A.1

Aus diesen Werten werden im Nachgang die mitteldruckabhängigen Schwingbreiten errechnet (Abbildung 5.13, S. 98). Um diese Werte ineinander umrechnen zu können, wird ein Smith-Diagramm entwickelt. Dieses wird konservativ ermittelt und kappt die sich ergebenden Werte für R, die unterhalb des Wertes der Probe liegen (siehe hierzu auch Abbildungen 5.6, S. 85 und 5.12, S. 97).

Das ermöglicht es, die Schwingbreiten auch mit Werten aus älterer Literatur zu vergleichen, bei denen die Schwingspiele noch mitteldruckabhängig ermittelt worden waren. Dazu zählen die DS 804 [22], aber auch die DIN 4132 [114].

Als weitere Beurteilungsgrundlagen werden die DV 848 der DEUTSCHEN

Errechnete Werte für $R =$	Ober- spannung $\sigma_{\text{oben}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{\text{mitte}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{\text{unten}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwing- breite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma$ nach EC 3 [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma$ nach DS 804 [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma$ nach DIN 4132 [N/mm <sup>2</sup> ]
-1,0	96,7	0,0	-96,7	193,5	160,0	274,0	210,0
-0,5	129,0	64,5	-64,5	193,5	160,0	258,0	196,8
0,0	193,5	193,5	0,0	193,5	160,0	230,0	175,0
0,1	214,9	236,4	21,5	193,5	160,0	217,0	166,7
0,4	269,6	377,4	107,8	161,8	160,0	173,0	134,7
0,5	294,5	441,8	147,3	147,3	160,0	154,0	120,8
<p>Werte für DS 804 aus Tab. 33 (Baustahl St 52), Kerbfall W I</p> <p>In RIL 805 werden keine Angaben zu Baustahl St 52 gemacht</p> <p>Werte für DIN 4132 aus Tab. 18, Gruppe B 6, Kerbfall W 1 (11)</p>							

**Abbildung 5.13:** Ergebnis der Schwingversuche, Probe G01-01, Schwingbreiten im Vergleich, Auszug aus Anlage A.1

REICHSBAHN [94] von 09/1981 und die DV 804 [93] der DEUTSCHEN BUNDESBAHN von 10/1951 herangezogen. Auch dort sind die Schwingbreiten mittelspannungsabhängig aufgeführt.<sup>4</sup>

Die Schwingbreiten, die im aktuellen Normwerk des EC 3 angegeben sind, werden unabhängig von der Mittelspannung formuliert, da bei großen Bauteilen stets ein hohes Maß an Eigenspannungen in der Konstruktion besteht.

Die Auswertung zeigt, dass sich die gemessenen Werte überwiegend oberhalb der Werte des EC 3 befinden. Somit kann unterstellt werden, dass der Ansatz der Werte des EC 3 in der Regel auf der sicheren Seite liegt. Erst ab einem Spannungsverhältnis von  $R \approx +0,40$  sinken die extrapolierten Messwerte unter die Werte des EC 3 ab. Damit wird der Ansatz, der dem EC 3 zugrunde liegt, für das ungeschweißte Altmateriale bestätigt.

Damit entspricht die Auswertung des Altmateriale den Angaben von NUSSBAUMER und GÜNTHER [19] für Neumateriale. Auch dort wird bei  $R \approx +0,40$  der

<sup>4</sup> In diesen Vorschriften werden nicht explizit die Schwingbreiten angegeben, diese lassen sich aber aus den zulässigen Spannungen berechnen.

Schnittpunkt der mittelspannungsabhängigen FAT-Klassen und des mittelspannungsunabhängigen EC 3 erreicht (siehe Abbildung 5.7, S. 86).

Im Rahmen dieser Arbeit wird auch die FAT 36 (Kreuzstoß) mit betrachtet, obwohl FAT-Klassen unterhalb 71 in der Regel im Brückenbau ausgeschlossen sind. Das dient der akademischen Abrundung der Untersuchungen, sofern das Probenmaterial das zulässt.

### 5.3.2 Verwendetes Probenmaterial

Das Probenmaterial stammt aus vier unterschiedlichen Proben, die allerdings nicht immer ausreichende Probenanzahlen zulassen.

#### **Grundmaterial G01:**

Proben hergestellt aus Kettengliedern einer zerborstenen Schleusenkette, etwa S355, vermutlich Thomasstahl, beruhigt oder besonders beruhigt vergossen, Probenmaterial ausreichend für FAT 160 und FAT 90.

#### **Grundmaterial G02:**

Proben hergestellt aus einer Diagonalen einer demontierten Untertageanlage, etwa S235, vermutlich Siemens-Martin-Stahl, unberuhigt vergossen, Probenmaterial ausreichend für FAT 160 und FAT 160 mit WEZ.

#### **Grundmaterial G03:**

Proben hergestellt aus einem demontierten Kranträger, etwa S235, vermutlich Thomasstahl, unberuhigt vergossen, Probenmaterial ausreichend für FAT 160, FAT 160 mit WEZ, FAT 112, FAT 90, FAT 71 und FAT 36.

#### **Grundmaterial G04:**

Proben hergestellt aus demontierten Winkelstützen (genietet), etwa S235, vermutlich Thomasstahl, unberuhigt vergossen, Probenmaterial ausreichend für FAT 160, FAT 160 mit WEZ, FAT 112, FAT 90, FAT 71 und FAT 36.

### 5.3.3 Schweißungen

Alle Schweißungen werden mit der gleichen Elektrode durchgeführt. Die Stumpfnähte werden mit einem Öffnungswinkel von  $60^\circ$  vorbereitet.

Es wird eine rutilbasische Stabelektrode Phoenix SH Gelb B (E 38 2 RB 12 nach DIN EN ISO 2560-A [115]) der Firma T-PUT verwendet. Die Herstellung erfolgt in Zugraupentechnik mit einer Gegenlage. Die Bewertung erfolgt auf Grundlage der Bewertungsgruppe B nach DIN EN ISO 5817 [116].

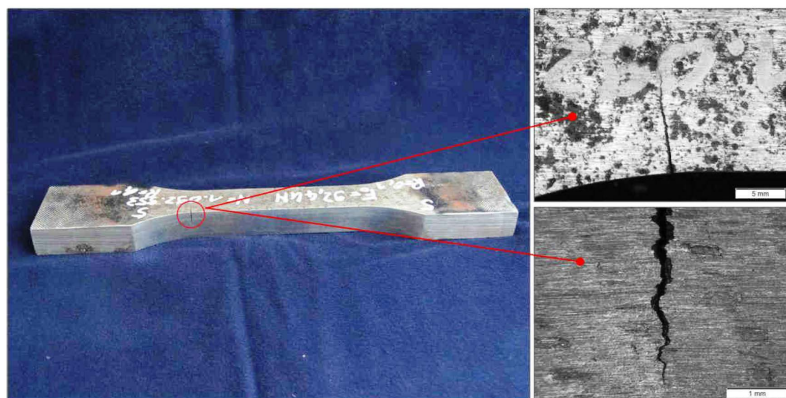
Die Kehlnähte werden mit der gleichen Elektrode geschweißt, hier wird ebenfalls die Zugraupentechnik verwendet.

### 5.3.4 Untersuchung des Grundmaterials

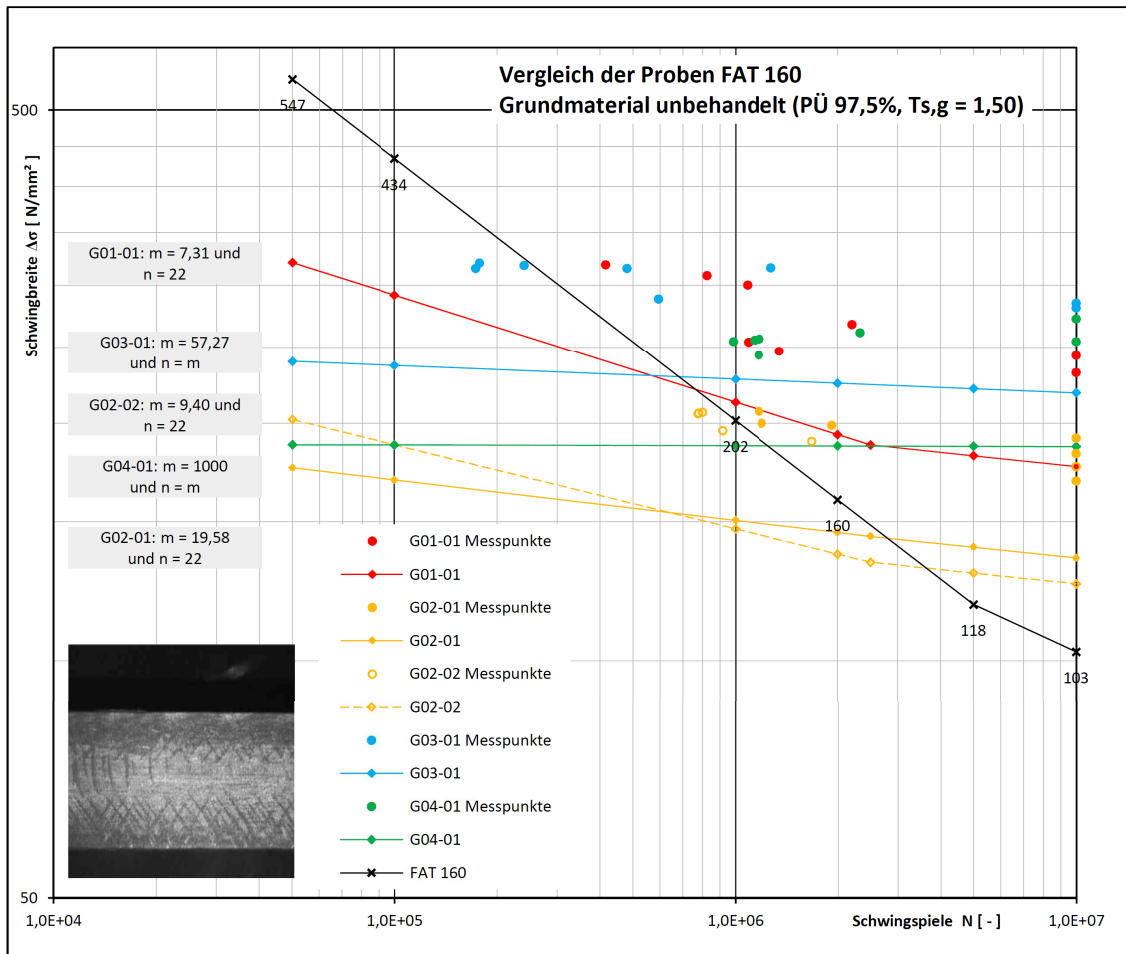
Die Untersuchung des Grundmaterials erfolgt stets für das ungeschweißte Grundmaterial, wobei einheitlich das Spannungsverhältnis  $R = +0,10$  gewählt wird. Die Proben wurden in Dauerschwingversuchen bis zum Bruch oder bis zum Erreichen der Schwingspielzahl  $10^7$  beansprucht.

Das Grundmaterial wird nicht beschliffen, sondern vielmehr „roh“ den Versuchen unterzogen. Das entspricht den Bedingungen im realen Tragwerk. Die Nachweise zeigen, dass die Rissinitiation stets an Rostnarben beginnt und sich von dort aus in das Grundmaterial fortsetzt (siehe hierzu Abbildung 5.14 auf S. 100).

Die gerechneten FAT-Linien weisen ein grundsätzlich ähnliches Erscheinungsbild auf. Sie sind jedoch sämtlich flacher geneigt als die Kurve nach EC 3.



**Abbildung 5.14:** Ermüdungsriss einer Grundwerkstoffprobe G01-01, links die Übersicht, rechts der Riss im Detail, oben Beginn des Risses an einer Rostnarbe

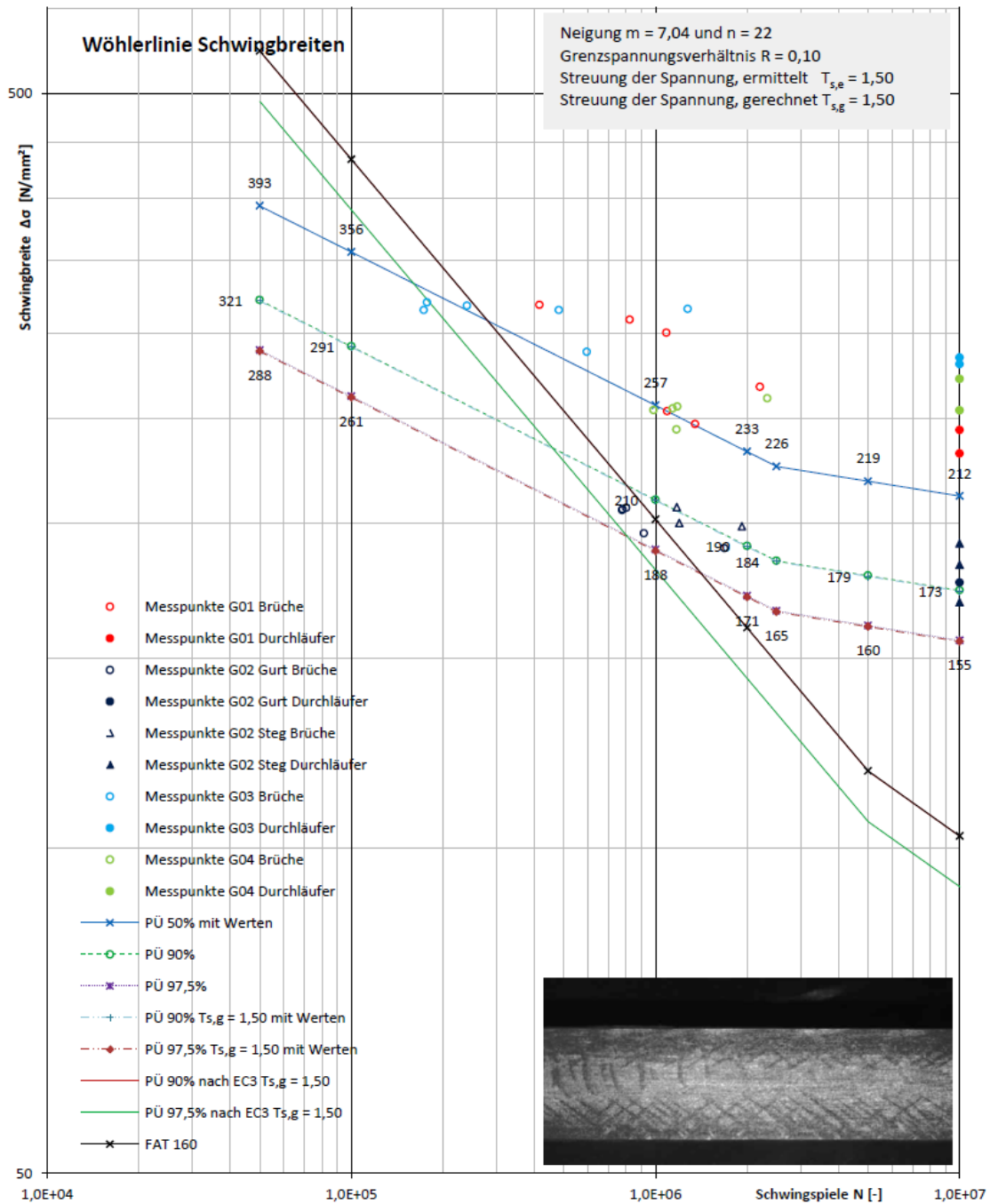


**Abbildung 5.15:** Vergleich der Proben G01 bis G04 – Grundmaterial FAT 160 – als separate Versuche

Die ermittelten Schwingbreiten liegen für drei Proben mit 225 N/mm<sup>2</sup>, 193 N/mm<sup>2</sup> und 188 N/mm<sup>2</sup> deutlich oberhalb der FAT von 160 N/mm<sup>2</sup>, für zwei Proben mit 145 N/mm<sup>2</sup> und 136 N/mm<sup>2</sup> knapp – mit 91% und 85% der FAT – darunter (Abbildung 5.15, S. 101). Insgesamt stellen sich die Proben überwiegend „gutmütiger“ dar, als es die Regelungen des EC 3 vermuten lassen.

Wenn diese Proben im Sinne des EC 3 ohne Berücksichtigung ihrer Herkunft (Spannungsverhältnis, Stahlgüte etc.) als eine Gesamtheit betrachtet werden – siehe hierzu die Anlage A.23, S. 247 –, ergibt sich ein erstaunliches Bild (Abbildung 5.16 auf S. 102).

Der beprobte Grundwerkstoff FAT 160 erfüllt die Anforderungen des EC 3



**Abbildung 5.16:** Vergleich der Proben G01 bis G04 – Grundmaterial FAT 160 – als Grundgesamtheit aus 35 Proben



vollständig. Es wird eine Schwingbreite von  $171 \text{ N/mm}^2$  erreicht (FAT 171). Aus den Versuchen ist abzuleiten, dass hinsichtlich des Grundmaterials aus Altstahl keinerlei Einschränkung der Verwendung besteht.

Es bleibt der Vorbehalt der verhältnismäßig geringen Probenanzahl (35) bestehen. Insofern sollte nicht voreilig geurteilt werden. Eine positive Tendenz ist jedoch feststellbar.

### 5.3.5 Untersuchung der Wärmeeinflusszone

Um den Einfluss der Wärme, die in der Wärmeeinflusszone in den Grundwerkstoff eingetragen wird, abzuklären, wird eine Auftragsraupe auf das Grundmaterial geschweißt und anschließend wieder blecheben in Kraftrichtung beschliffen. Auf der abliegenden Seite der Probe ist das unbehandelte Grundmaterial noch mit Rostnarben vorhanden.

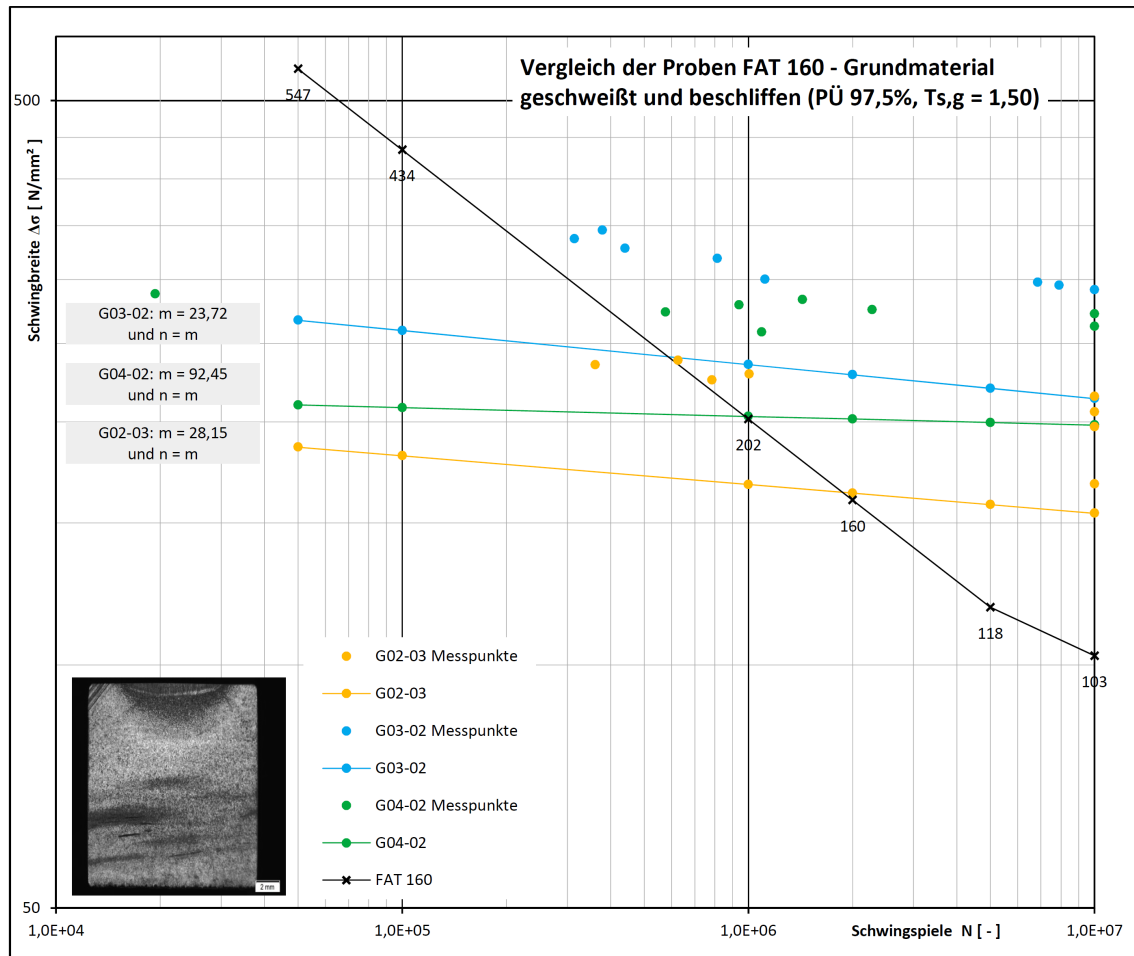
Die gerechneten FAT-Linien weisen ein nahezu gleiches Erscheinungsbild auf. Sie sind jedoch deutlich ( $m = 28$  und  $m = 24$ ) flacher geneigt als die Kurve nach EC 3.

Die ermittelten Schwingbreiten sind jetzt für alle drei Proben mit  $229 \text{ N/mm}^2$ ,  $202 \text{ N/mm}^2$  und  $163 \text{ N/mm}^2$  oberhalb der FAT von  $160 \text{ N/mm}^2$ . Die Werte sind gegenüber dem Grundmaterial demnach angestiegen! Das ist in Abbildung 5.17 auf S. 104 dargestellt.

Der Einfluss der Wärme durch die Auftragsraupe wird noch deutlicher, wenn die Wöhlerlinien der Grundwerkstoffe mit und ohne Auftragsraupe gegeneinander aufgetragen werden (Abbildung 5.18 auf S. 105). Die Schwingbreite der Probe G02 steigert sich von  $145 \text{ N/mm}^2$  auf  $163 \text{ N/mm}^2$ , die der Probe G03 wächst von  $228 \text{ N/mm}^2$  auf  $235 \text{ N/mm}^2$ , die der Probe G04 steigt von  $187 \text{ N/mm}^2$  auf  $202 \text{ N/mm}^2$  an.

Die errechnete Schwingbreite der Probe G02 ist von  $145 \text{ N/mm}^2$  auf  $163 \text{ N/mm}^2$  um  $18 \text{ N/mm}^2$  angestiegen. Das ist ein prozentualer Anstieg von rund 12%. Bei der Probe G03 beträgt der Anstieg immerhin noch  $7 \text{ N/mm}^2$ , das entspricht 3%. Bei der Probe G04 steigt die Schwingfestigkeit um  $15 \text{ N/mm}^2$ , das entspricht einem Anstieg von rund 8%.

Somit sind 5 von 6 Proben an dieser Stelle besser als die Werte, die der EC 3 fordert. Es muss wohl resümiert werden, dass das Eintragen von Wärme – hier



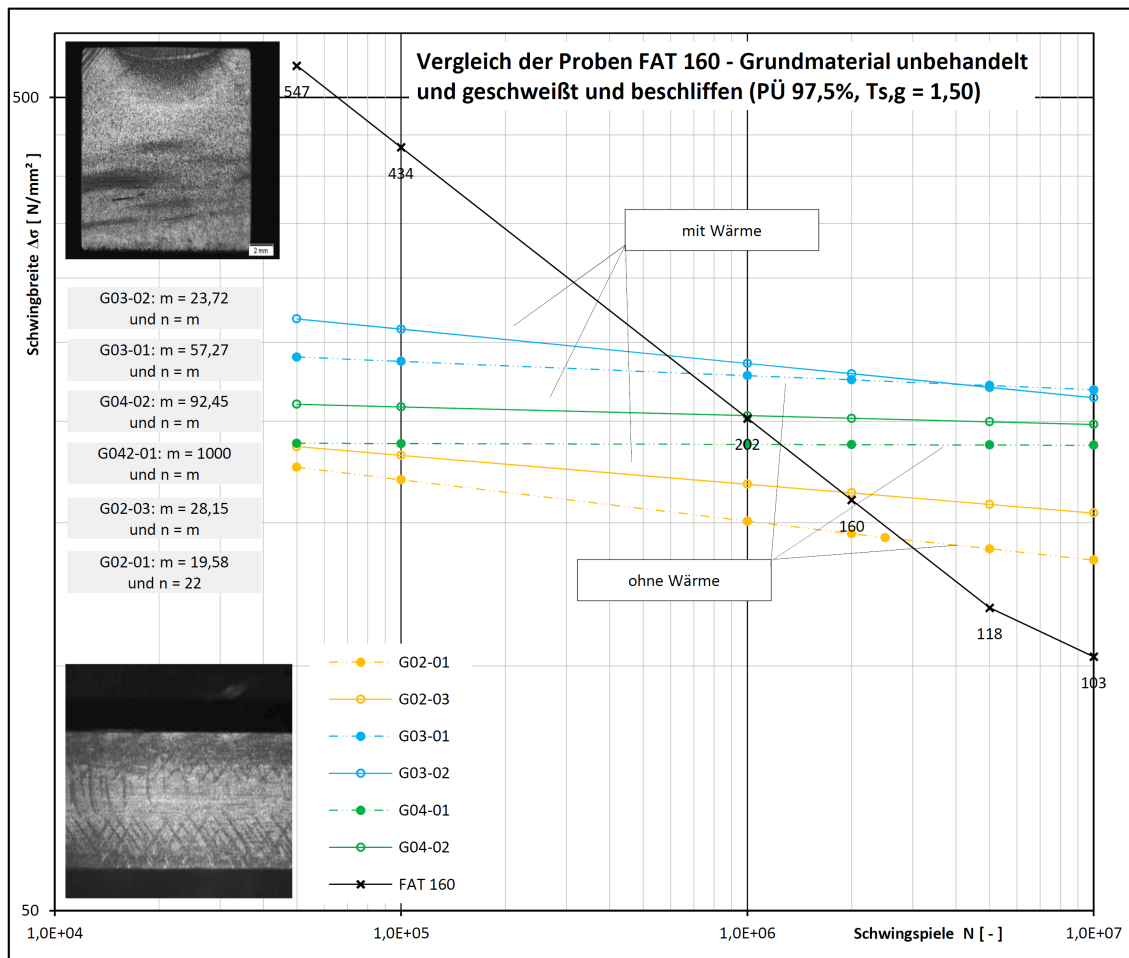
**Abbildung 5.17:** Vergleich der Proben G02 bis G04 – Grundmaterial FAT 160 mit Wärmeeinfluss – als separate Versuche

Schweißwärme – keinen negativen Einfluss auf das Dauerschwingverhalten des Grundwerkstoffes ausübt.

Vielmehr scheint es so zu sein, dass die eingetragene Schweißwärme die Wöhlerlinie nach oben verschiebt, sie sozusagen in eine höhere FAT-Klasse anhebt.

Mit diesem Ergebnis war in dieser Form nicht zu rechnen, eher wäre ein deutlicher Abfall der Schwingbreite zu erwarten gewesen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Kerbschläge, die nach dem Glühen der Proben angefertigt werden, einen deutlich besseren Widerstand gegen Bruch aufweisen (vgl. Abschnitt 4.3.4 auf S. 72 ff., dort die Abbildungen 4.12 und 4.13). Aus beiden Messergebnissen kann gefolgert werden, dass der Wärmeeintrag in



**Abbildung 5.18:** Vergleich der Proben G02 bis G04 – Grundmaterial FAT 160 mit und ohne Wärmeeinfluss – als separate Versuche

den Altstahl zu einem Glühen – in Sinne von Normalglühen – des alten Materials führt und dieses in einen Gefügezustand versetzt, der dem Dauerschwingen gegenüber widerstandsfähiger ist.

Zu klären bleibt, wie lange dieser Zustand anhält und wann sich die Alterung infolge von Stickstoffdiffusion wieder einstellt.

Werden auch in diesen Versuchsreihen die Werte zusammen als Ganzheit betrachtet, zeigt sich in Abbildung 5.19 auf S. 107, dass die Schwingbreite sich zu  $181 \text{ N/mm}^2$  einstellt und damit die Werte des EC 3 und auch die des Grundwerkstoffes von  $171 \text{ N/mm}^2$  übertrifft.

In dieser Versuchsreihe bleibt ebenfalls der Vorbehalt der geringen Probenanzahl (hier 19) bestehen. Weiterhin ist die Frage offen, wann die Zähigkeit, die sich durch die Schweißwärme verbessert hat, wieder auf ihr Ursprungsmaß zurückfällt.

### 5.3.6 Untersuchung der Vollnaht FAT 112

Die FAT 112 stellt die Vollnaht in Sondergüte dar. Die Naht wird von beiden Seiten geschweißt und danach einer zerstörungsfreien Prüfung (ZFP) durch Ultraschall (UT) oder Röntgen (RT) unterzogen.

Anschließend wird die Naht blecheben in Krafrichtung beschliffen, sodass keine Nahtüberhöhungen mehr vorhanden sind. Damit ist die mögliche Kerbwirkung auf ein Minimum reduziert.

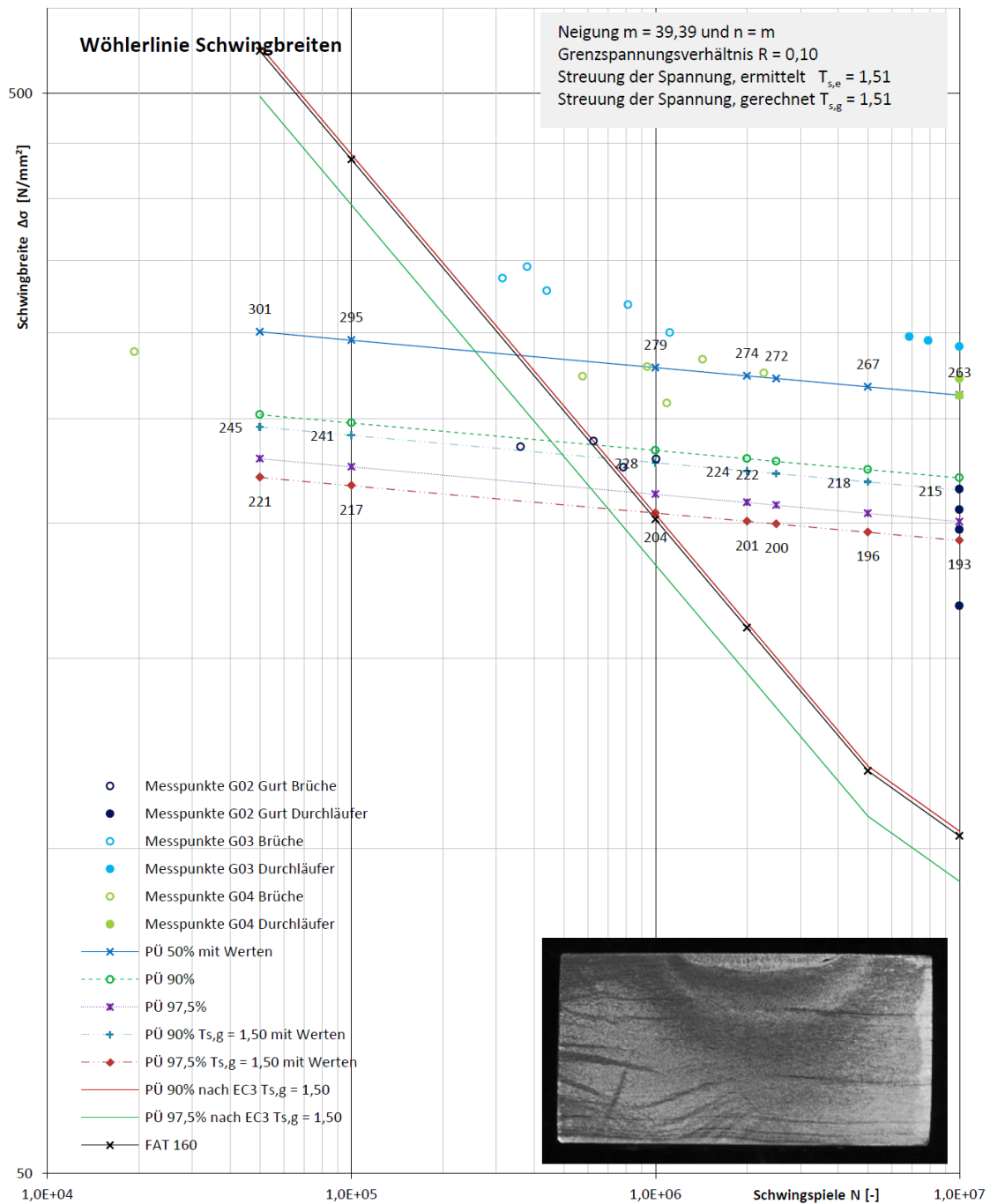
Seitlich neben den Schweißungen sind jedoch noch die normalen Bereiche des Altstahls vorhanden, die mehr oder minder stark mit Rostnarben besetzt sind.

Die Auswertung der Ergebnisse (Abbildung 5.20 auf S. 108) zeigt, dass die Forderungen der Norm bezüglich der Schwingbreite der einzelnen Versuche eingehalten sind. Es werden  $148 \text{ N/mm}^2$  und sogar  $183 \text{ N/mm}^2$  erreicht.

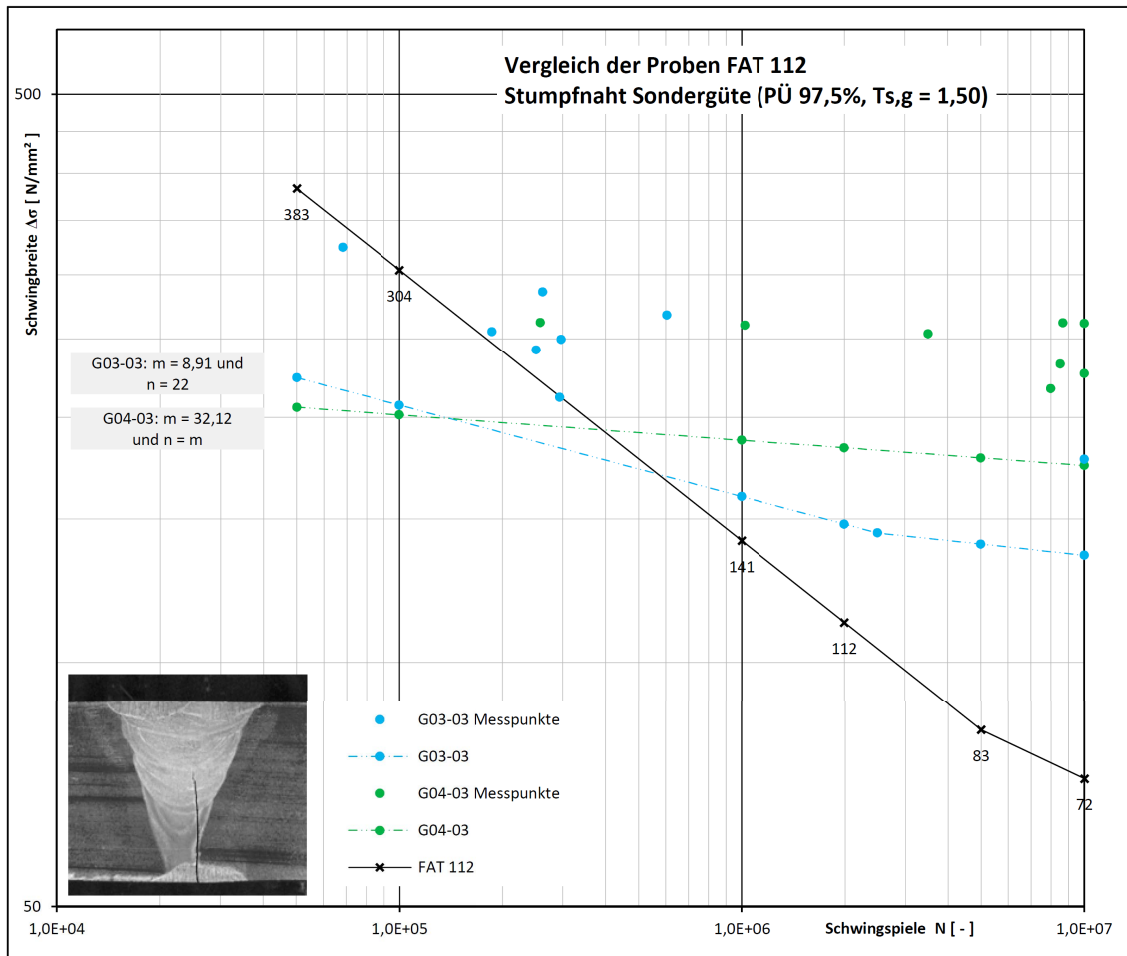
Auch wenn die Versuche als eine Probengrundlage (Abbildung 5.21 auf S. 109) gewählt werden, ist die nach EC 3 geforderte Schwingbreite von  $112 \text{ N/mm}^2$  eingehalten. Der ermittelte Wert liegt bei  $168 \text{ N/mm}^2$ .

Die Vorbehalte, die bereits unter der vorgenannten Punkten geäußert wurden, gelten auch hier, insbesondere hinsichtlich der geringen Probenanzahl (in diesem Fall 16).

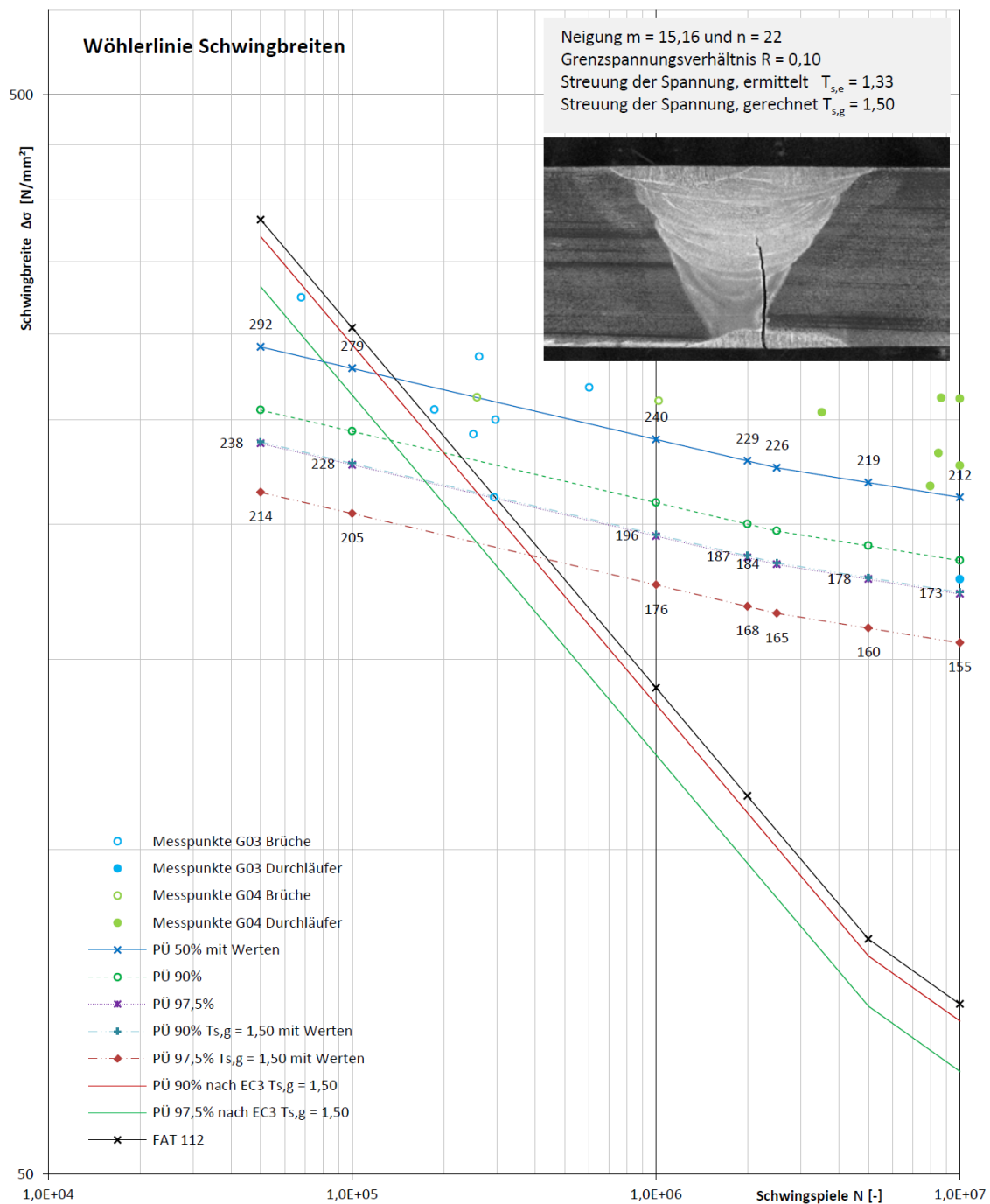
Insgesamt aber deutet sich an, dass die Schwingbreiten, die aus den Versuchen ermittelt werden, immer oberhalb der nach Norm geforderten liegen.



**Abbildung 5.19:** Vergleich der Proben G02 bis G04 – Grundmaterial FAT 160 mit WEZ – als Grundgesamtheit aus 19 Proben



**Abbildung 5.20:** Vergleich der Proben G03 und G04 – Vollnaht FAT 112 – als separate Versuche



**Abbildung 5.21:** Vergleich der Proben G03 bis G04 – Vollnaht FAT 112 – als Grundgesamtheit aus 16 Proben

### 5.3.7 Untersuchung der Vollnaht FAT 90

Diese Naht ist ebenfalls eine Vollnaht, die von beiden Seiten geschweißt wird. Sie wird ebenfalls einer ZFP unterzogen, die Nahtüberhöhungen werden aber nicht beschliffen.

Die Nahtüberhöhung darf einen Wert von 10% der Nahtbreite aufweisen. Das korrespondiert fast genau mit der Bewertungsgruppe B der Norm DIN EN ISO 5817 [116]. Nach den Forderungen der DIN EN ISO 6520 [117] für die geometrische Unregelmäßigkeit „zu große Nahtüberhöhung“, dort als Ordnungsnummer 502 geführt, darf diese in der Bewertungsgruppe B folgenden Wert annehmen:

$$h \leq 1 + 0,10 \cdot b \text{ und } h \leq 5 \text{ [mm]} \quad (5.9)$$

In dieser Gleichung stehen

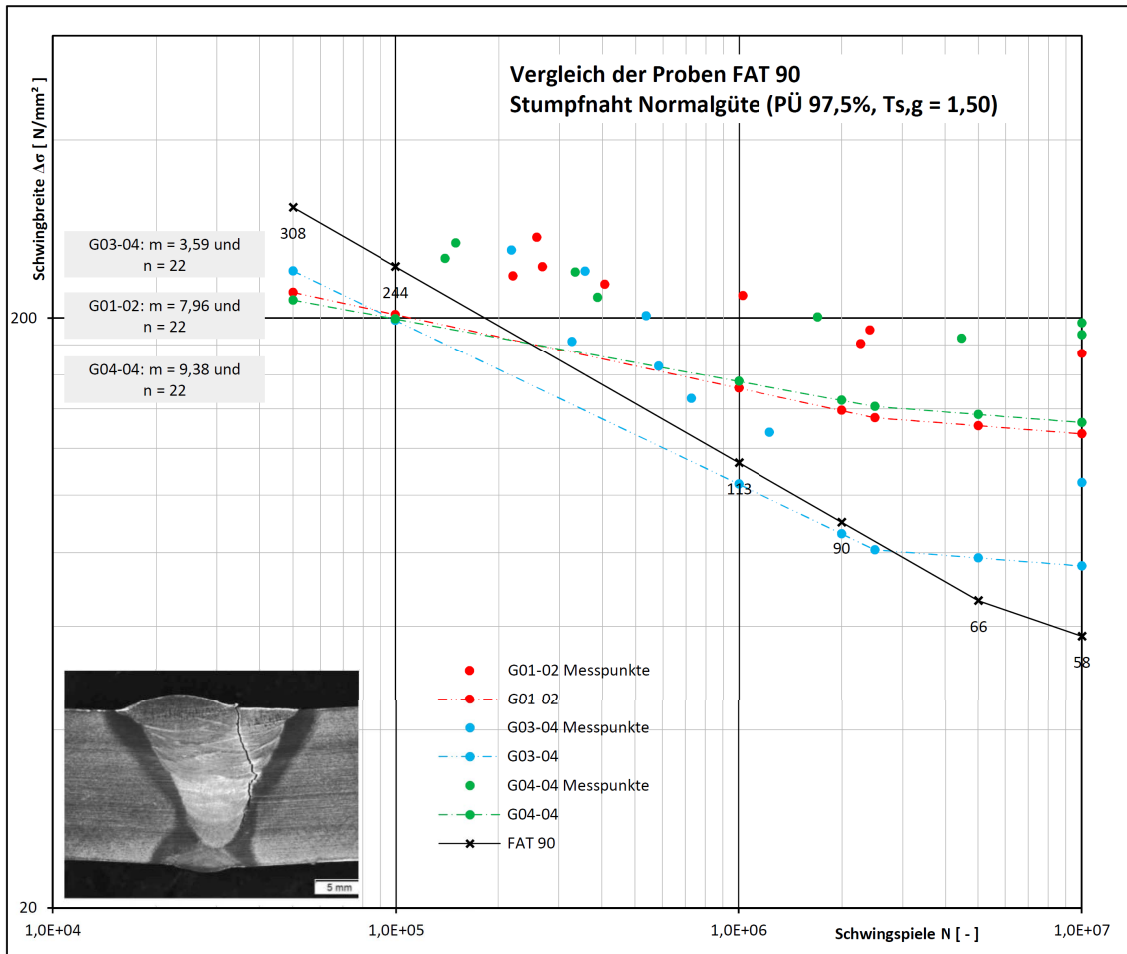
- h für die Nahtüberhöhung und
- b für die Nahtbreite.

Es gibt also, bedingt durch die Überhöhung der Naht an Wurzel und Decklage, eine leichte geometrische Kerbe. Das ist hier das Ansteigen der Naht gegenüber dem Grundmaterial – auch als schroffer Nahtübergang bezeichnet. Die Norm fordert einen **weichen Nahtübergang**. Dieser vermindert Spannungsspitzen und verzögert damit die Rissinitiation.

Die Betrachtung als einzelne Versuchsreihen ergibt Schwingbreiten, die von 145 N/mm<sup>2</sup> über 139 N/mm<sup>2</sup> bis hin zu 86 N/mm<sup>2</sup> reichen – alles Werte, die für sich die Forderungen der Norm übererfüllen bzw. fast genau erfüllen (siehe hierzu Abbildung 5.22 auf S. 111).

Werden die Versuche zusammengefasst – das Verfahren, das bei der Ermittlung der FAT-Werte nach DIN EN 1993-1-9 [13] angewendet wurde –, errechnet sich über alle 24 Versuche (Abbildung 5.23 auf S. 112) eine Schwingbreite von 130 N/mm<sup>2</sup>.





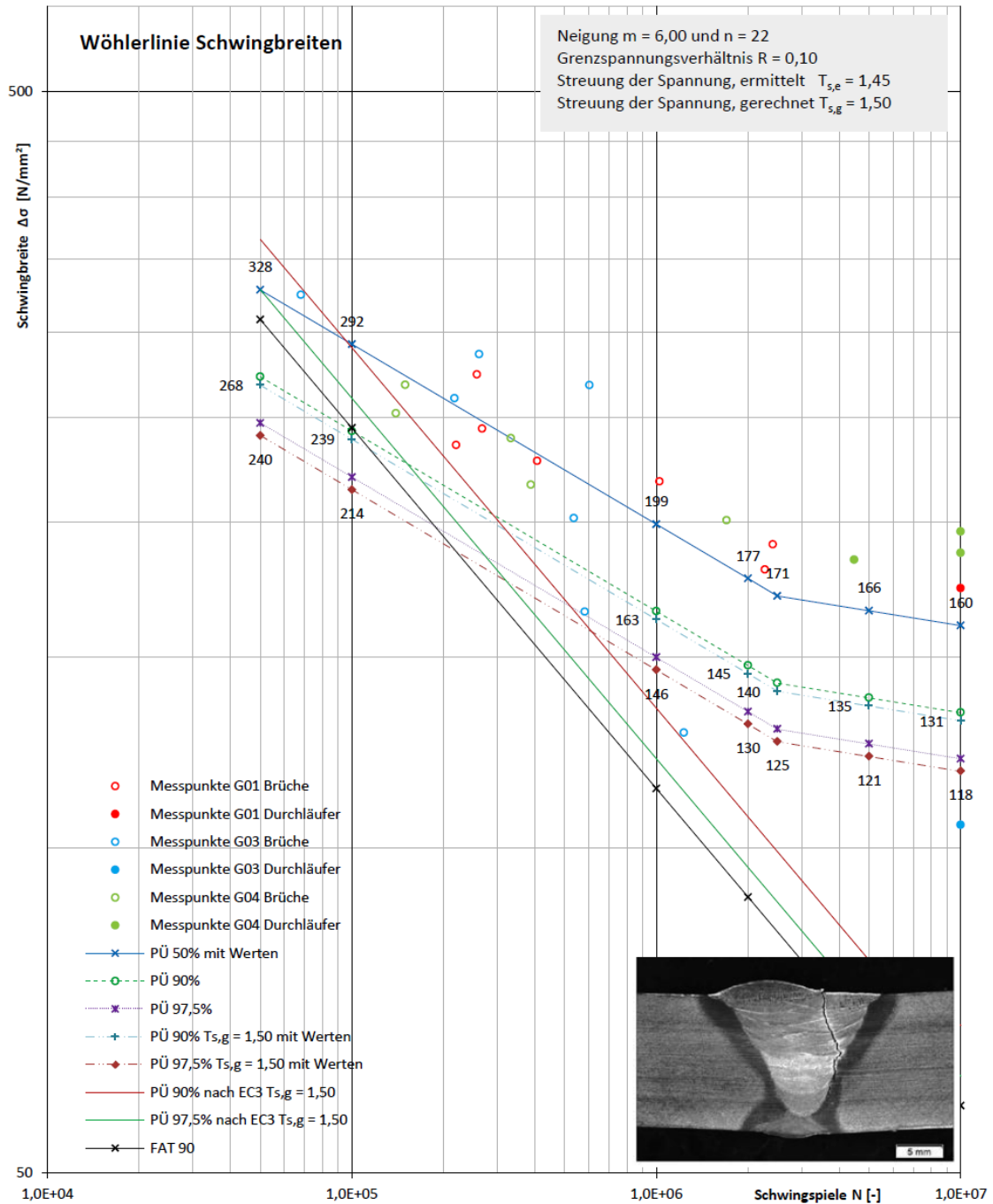
**Abbildung 5.22:** Vergleich der Proben G01, G03 und G04 – Vollnaht FAT 90 – als separate Versuche

### 5.3.8 Untersuchung der Vollnaht FAT 71

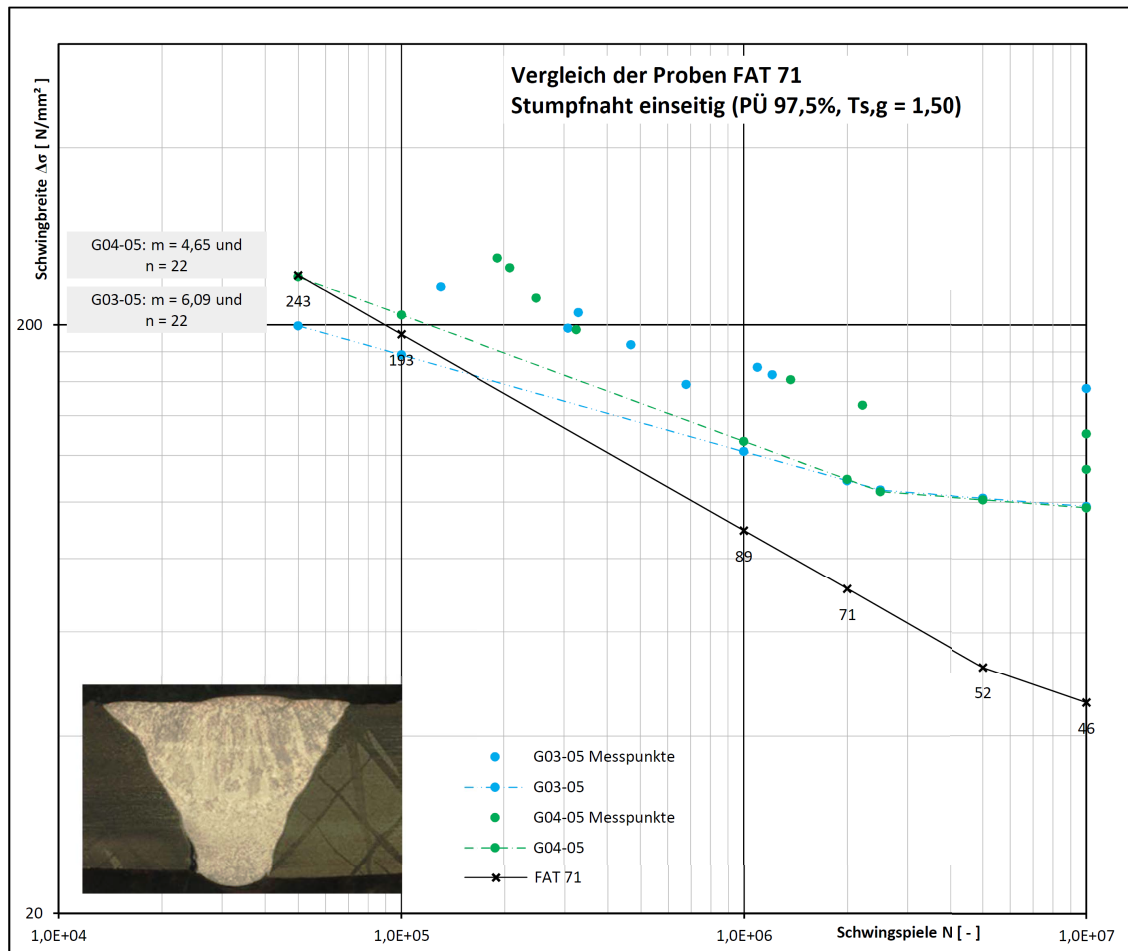
Diese Naht ist eine einseitig geschweißte Vollnaht, die durch ZFP auf Fehlerfreiheit geprüft wird. Durch die einseitige Schweißung kann es zu einem Wurzeldurchgang kommen, der die Dauerfestigkeit der Naht negativ beeinflusst. Daher ist die ertragbare Schwingbreite mit 71 N/mm<sup>2</sup> anzusetzen.

Die einzelnen Versuchsreihen zeigen mit 108 N/mm<sup>2</sup> und 109 N/mm<sup>2</sup> jeweils Schwingbreiten, die oberhalb der Werte der FAT 71 liegen.

Die Betrachtung über alle 16 Proben (Abbildung 5.25 auf S. 114) liefert eine Schwingbreite von 108 N/mm<sup>2</sup>. Das liegt klar oberhalb der geforderten 71 N/mm<sup>2</sup>.



**Abbildung 5.23:** Vergleich der Proben G01, G03 und G04 – Vollnaht FAT 90 – als Grundgesamtheit aus 24 Proben



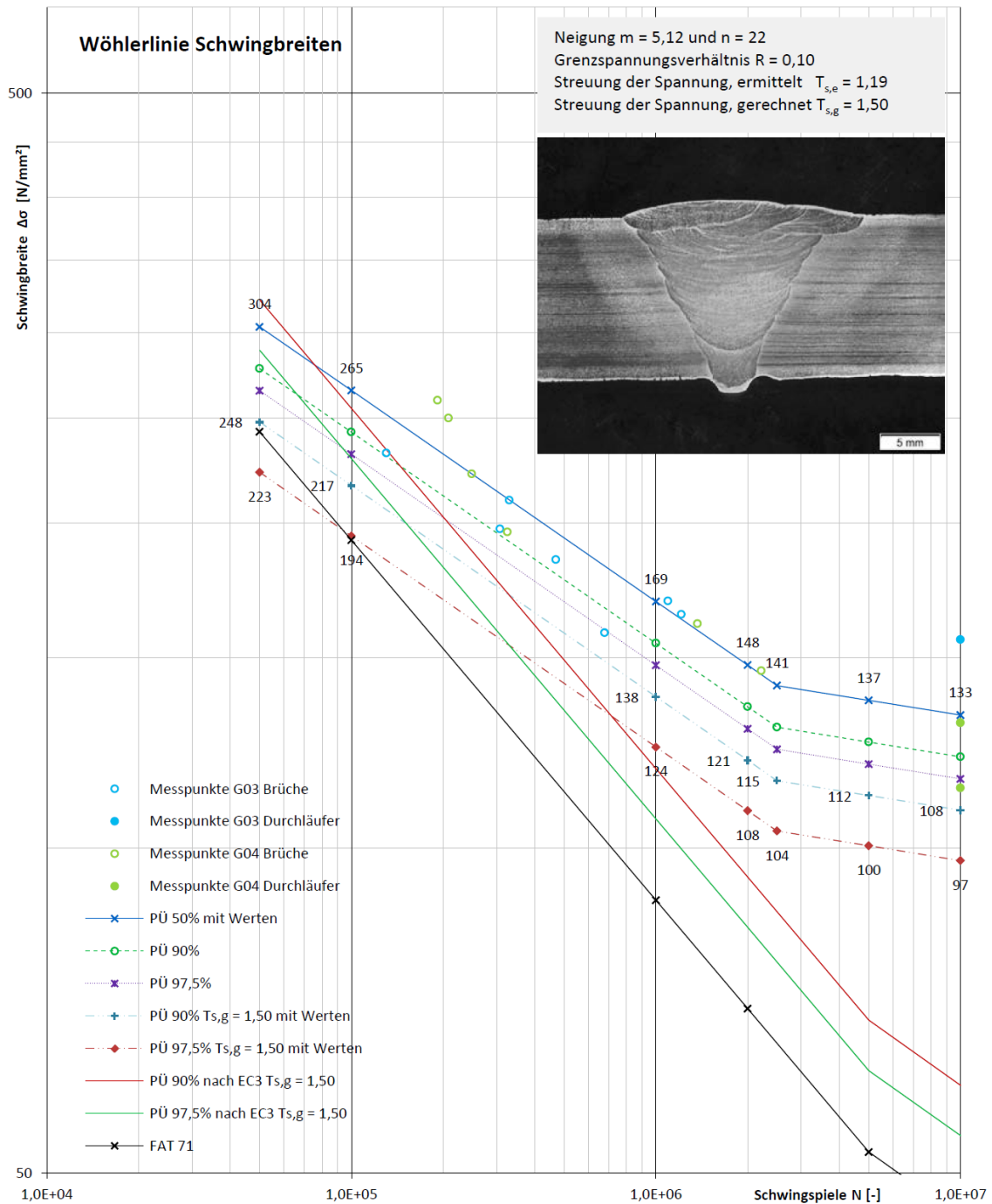
**Abbildung 5.24:** Vergleich der Proben G03 und G04 – Vollnaht FAT 71 – als separate Versuche

Ganz offensichtlich birgt diese FAT-Klasse ein großes Maß an Sicherheiten gegenüber den anzusetzenden Werten der FAT 71.

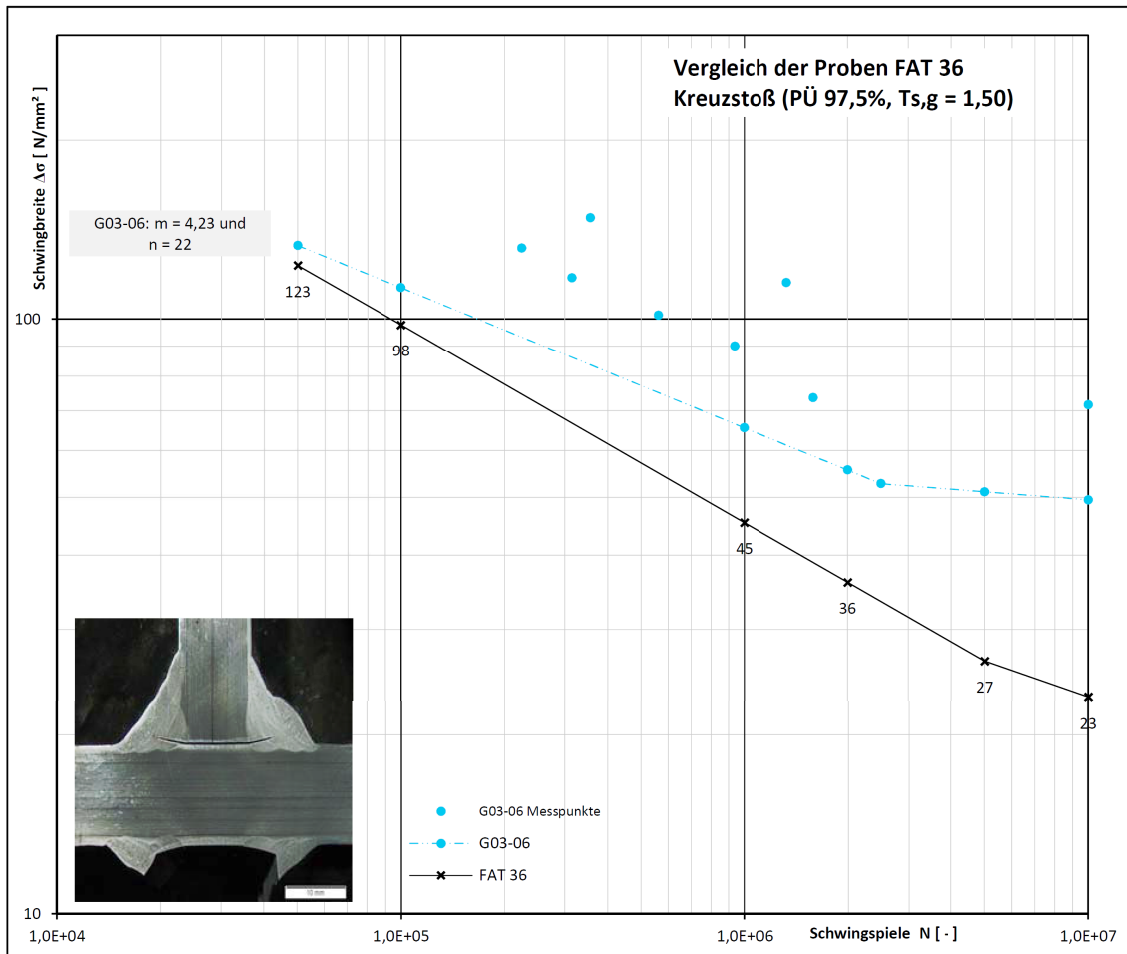
### 5.3.9 Untersuchung des T-Stoßes FAT 36

Die FAT 36 wurde untersucht, um den Umfang der Arbeit abzurunden. Jedoch nur bei einer Probe, dem Grundmaterial G03, stand Probenmaterial in ausreichender Menge zur Verfügung.

Im Rahmen von Instandsetzungsarbeiten an Brücken würde diese gering tragfähige FAT-Klasse ohnehin nicht oder nur in abgestimmten Ausnahmefällen zur



**Abbildung 5.25:** Vergleich der Proben G03 und G04 – Vollnaht FAT 71 – als Grundgesamtheit aus 16 Proben



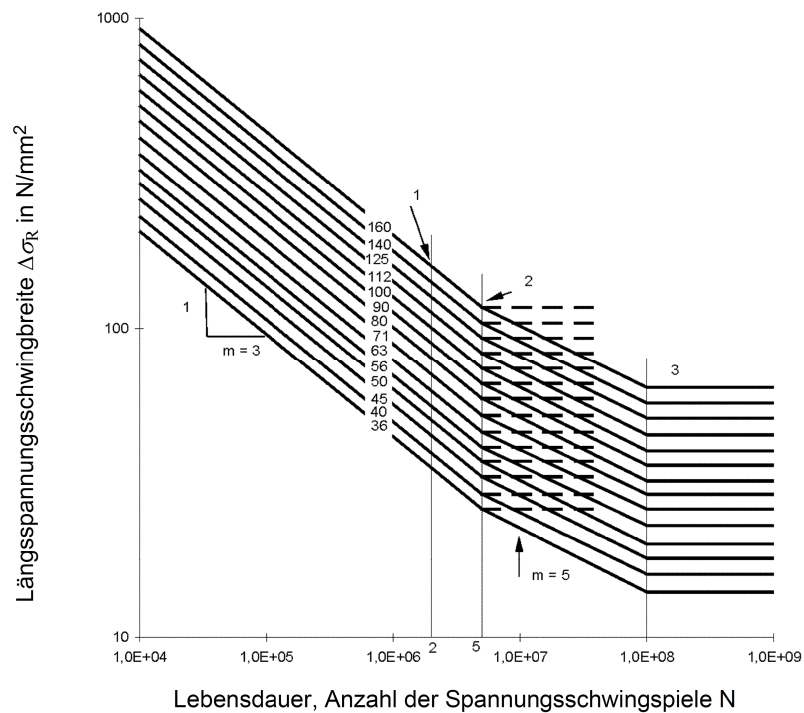
**Abbildung 5.26:** Vergleich der Proben G03 – Kehlnaht Kreuzstoß FAT 36 – als separate Versuche

Verwendung kommen.

Es zeigt sich jedoch auch hier, dass der ermittelte Wert der Schwingbreite mit 56 N/mm<sup>2</sup> den Anforderungswert von 36 N/mm<sup>2</sup> übertrifft. Das ist in Abbildung 5.26 auf S. 115 dargestellt.

Dieses Ergebnis steht nicht im Widerspruch zu der im EC 3-1-9 [13, S. 19] abgedruckten Anmerkung 3, die besagt:

„Die Testdaten einiger Kerbdetails lassen sich nicht eindeutig den Ermüdungsfestigkeitskurven in Bild 7.1 zuordnen. Die Kerbfallkategorien, die mit einem Stern gekennzeichnet sind, wurden eine Kategorie tiefer eingestuft, um die Dauerfestigkeit  $\Delta\sigma_D$  den Ergebnissen von Versuchen anzupassen. Die Kerbfallkategorien



**Abbildung 5.27:** Ermüdungsfestigkeitskurve für Längsspannungsschwingbreiten, aus [13, S. 18]

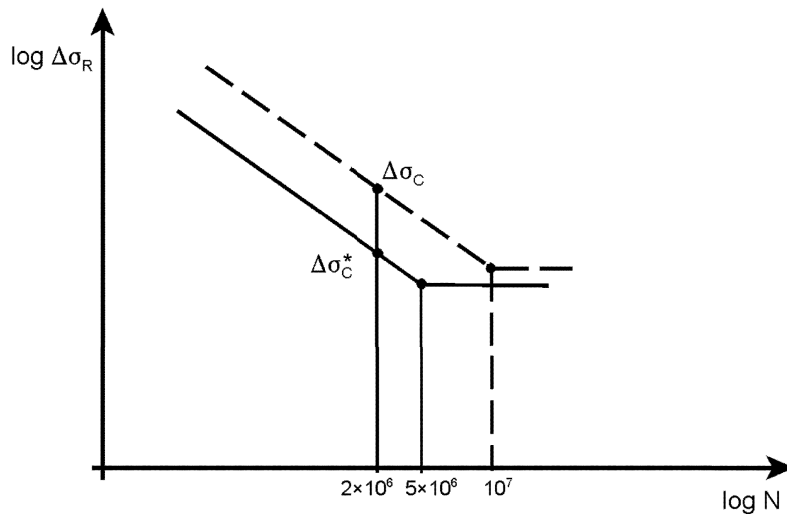
$\Delta\sigma_C$  dürfen in diesen Fällen um eine Kategorie angehoben werden, wenn die S-N-Kurve mit  $m = 3$  bis zur Dauerfestigkeit  $\Delta\sigma_C^*$  bei  $N_D^* = 10^7$  verlängert wird, siehe Bild 7.3.“<sup>56</sup>

Im weiteren Verlauf der Arbeit sind die im vorstehenden Zitat genannten Bilder (7.1 und 7.3) als Abbildungen 5.27 und 5.28 eingefügt (S. 116).

Da nur eine Versuchsreihe durchgeführt wird, entspricht der Einzelversuch der Grundgesamtheit. Aus Gründen der Einheitlichkeit der wissenschaftlichen Arbeit wird aber auch die Darstellung als Grundgesamtheit eingefügt (Abbildung 5.29 auf S. 118). Dort sind auch die Überlebenswahrscheinlichkeiten unter einer Spannungsstreuung von 1 : 1,50 aufgetragen.

<sup>5</sup> Kerbfallkategorie bei  $2 \cdot 10^6$  Schwingspielen [Anm. d. Verf.]

<sup>6</sup> Dauerfestigkeit bei  $5 \cdot 10^6$  Schwingspielen [Anm. d. Verf.]



**Abbildung 5.28:** Alternative Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_C$  für Kerbfälle, die mit  $\Delta\sigma_C^*$  bezeichnet sind, aus [13, S. 20]

### 5.3.10 Grundsätzliche Erkenntnisse

Eine Erkenntnis aus den Versuchen ist, dass der vermeintlich „gute“ Siemens-Martin-Stahl (Grundwerkstoff G02) in den Dauerschwingversuchen gegenüber den Thomasstählen (Grundwerkstoffe G01, G03 und G04) schlechter abschneidet, als es erwartet wurde. Das zeigt die Abbildung 5.15 auf S. 101.

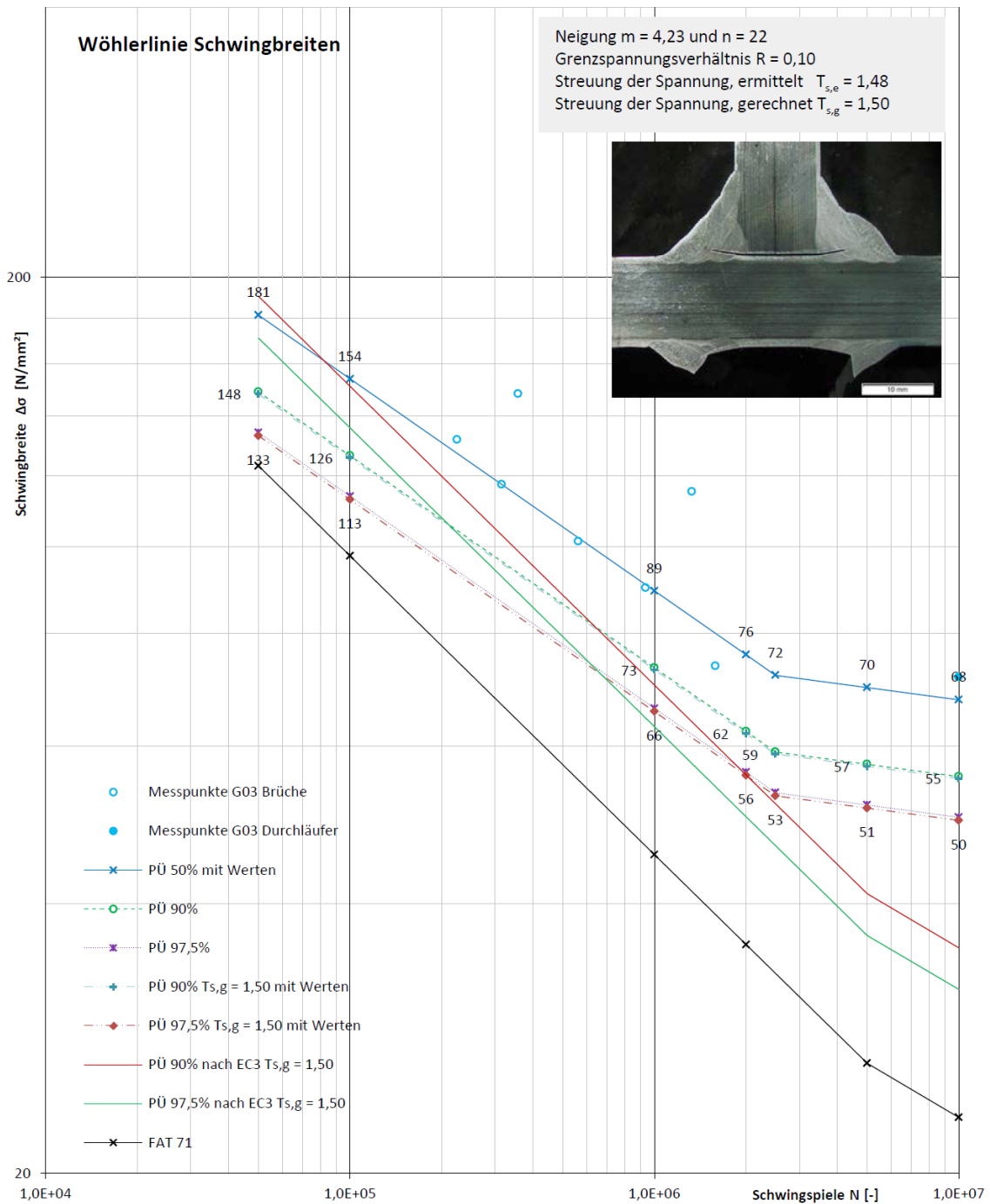
Auch die erwärmten Proben - Auftrag und Abschleif einer Schweißraupe – des Siemens-Martin-Stahls liegen unterhalb der Werte der Thomasstähle (Abbildung 5.17, S. 104).

Weiterhin zeigt die eingetragene Wärme des Schweißprozesses zwei erstaunliche Effekte.

Bei der überwiegenden Anzahl der Proben tritt ein **Zuwachs bei der errechneten Schwingbreite** auf. Das war nicht zu erwarten. Die Prozesswärme kommt einer Wärmebehandlung gleich und normalisiert somit das Altmaterial.

Somit werden auch die **Werte der Kerbschlagarbeit** angehoben. Das ist in Tabelle 5.6 auf S. 120 dargestellt.

Bislang wurden 123 Dauerschwingproben untersucht, jedoch nur aus vier Bauwerken. Es handelt sich also um eine verhältnismäßig kleine Anzahl von Proben. Es scheint deshalb in Anbetracht der geringen Probenanzahl geboten, nicht zu



**Abbildung 5.29:** Vergleich der Proben G03 - Kehlnaht Kreuzstoss FAT 36 als Grundgesamtheit aus 8 Proben



überschwänglich zu formulieren. Aus diesem Grunde wird vorsichtig formuliert:

**Das Schweißen an Altmaterial hat keinen signifikanten negativen Einfluss auf die Dauerfestigkeit von Altstahlkonstruktionen. Entscheidend ist die geometrische Kerbe im Bauteil – die Kerbe macht den Bruch.**

#### 5.3.11 Grundsätzliche Einwände

Für eine umfängliche Auswertung sind die hier vorliegenden Probenanzahlen zu gering und müssten aufgestockt werden.

Die nachgewiesenen Zuwächse bei Schwingbreite und Kerbschlagarbeit sind nicht von Dauer. Im Zuge der weiteren Nutzungsdauer des Bauwerkes werden sich diese wieder reduzieren. Der Stickstoff im Altstahl wird sich wieder an Versetzungen im Material sammeln und zu Verfestigungen und damit auch zu Versprödungen führen.

**Wie lange die ermittelten Zuwächse der Schwingbreite vorhalten, bleibt demnach unklar – hier besteht Raum für weitere Forschungen. Sicher ist, dass der mit Stickstoff angereicherte windgefrischte Stahl erneut altern wird und sich erneut Versprödungen bilden werden.**

Art	FAT nach nach EC 3	FAT über alle Proben	FAT als kleinster Einzelwert	FAT als größter Einzelwert	Anzahl der Einzel- proben	Anzahl der Ver- suchs- reihen
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]		
Grundwerkstoff ohne Wärme	160	170,8	136,5	224,8	35	5
Grundwerkstoff mit Wärme	160	200,8	163,2	228,7	24	3
Stumpfnahht Sondergüte	112	167,9	147,9	183,5	16	2
Stumpfnahht Normalgüte	90	130,1	86,0	144,7	24	3
Stumpfnahht ein- seitig	71	108,3	108,7	109,2	16	2
Kreuzstoß	36	55,6	55,6	55,6	8	1

**Tabelle 5.6:** Übersicht über die errechneten Schwingbreiten für  $R = 0,10$

## **6 Ermittlung der Restlebensdauer nach RIL 805**

### **6.1 Prinzipielles Vorgehen nach RIL 805**

Das prinzipielle Vorgehen zur Ermittlung der Restlebensdauer von Brückenbauwerken aus Altstahl ist durch die RIL 805 [3] vorgegeben. Allerdings sagt diese Richtlinie nichts darüber aus, wie mit reparaturgeschweißten Bauwerken zu verfahren ist.

Diese Frage soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht und möglichst beantwortet werden.

### **6.2 Restlebensdauer reparaturgeschweißter Bauwerke nach RIL 805**

Die durchgeführten Versuche und die Auswertung ihrer Ergebnisse lassen vorsichtig vermuten, dass prinzipielle Vorgehen bei Anwendung der RIL 805 möglicherweise nicht verändert werden sollte.

Die hier untersuchten Kerbdetails

- FAT 160,
- FAT 160 mit Wärmeeinflusszone,
- FAT 112,
- FAT 90,
- FAT 71 und
- FAT 36

zeigen auf, dass das Schweißen von Altstahl keinen signifikant negativen Einfluss auf die Lebensdauer der betrachteten Bauteile ausübt.

Das prinzipielle Konstruktionsdetail hat dagegen großen Einfluss auf das zeitabhängige Verhalten.

Das deutet darauf hin, dass diejenigen, die möglicherweise Reparaturschweißungen planen oder realisieren wollen, bei korrekt geplanten und ausgeführten Schweißnähten nahezu genau diejenigen Schwingbreiten erwarten dürfen, die der Normgeber ihnen im EC 3 mitgeteilt hat.

Hinsichtlich der Restlebensdauer von nicht vorwiegend ruhend beanspruchten Bauwerken scheint jedoch klar zu sein, dass der Einfluss des Schweißens ohne Berücksichtigung bleiben kann. Als Arbeitsthese für weitere Untersuchungen bedeutet das:

**Die RIL 805 kann unverändert auf die Bewertung alter Brückenbauwerke angewendet werden, selbst wenn sie reparaturgeschweißt worden sind.**

#### 6.2.1 Einflussgröße Temperatureintrag durch das Schweißen

Das Schweißen zeigt erstaunlicherweise kaum negativen Einfluss auf die Dauerfestigkeit der Bauteile.

Im Zuge der Untersuchungen stellte sich heraus, dass die im Schweißprozess eingebrachte Wärme teilweise die mechanischen Kennwerte anhebt (siehe hierzu die Anlagen A.6, S. 168 ff., und A.7, S. 173 ff.) und das auch ein positiver – ein erhöhender – Einfluss auf die ertragbare Kerbschlagarbeit der Proben zu bemerken ist. Das sind beides sehr begrüßenswerte Effekte, die es auszunutzen gilt.

Um zum Beispiel eine Eisenbahnbrücke, die an ihrer Lebensdauergrenze angekommen ist, noch einige Jahre in betriebsfähigem Zustand zu halten, ist es – den Ergebnissen der untersuchten Proben zufolge – wünschenswert, das Bauwerk komplett normalzuglügen. Das ist zumindest akademisch kein Problem.

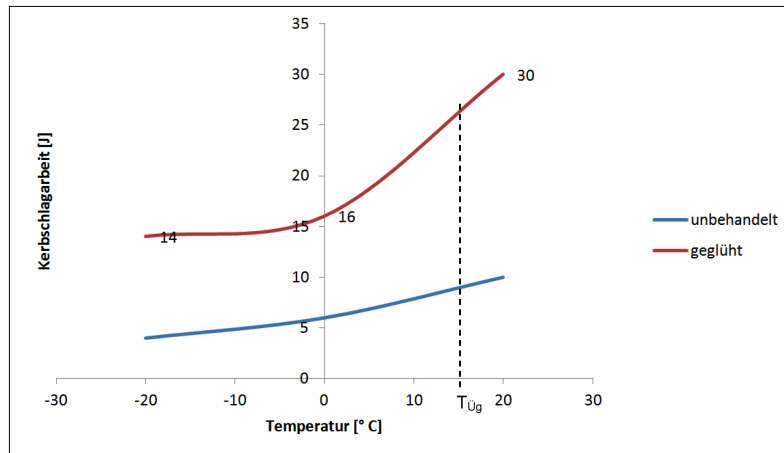
Praktisch jedoch wird sich das Normalglühen auf einige wenige Bereiche des Bauwerkes beschränken müssen, die mit Glühmanschetten erreichbar und bei denen die erforderlichen Abstützungen realisierbar sind (siehe hierzu Abbildung 6.1 auf S. 123).

#### 6.2.2 Einflussgröße Kerbschlagarbeit

Die Kerbschlagarbeit aller untersuchten Proben liegt unterhalb der Werte, die ein Schweißen ermöglichen. Alle Proben werden, gerade auch wegen der geringen Werte von teilweise nur 3 J, als nicht schweißgeeignet eingestuft.



**Abbildung 6.1:** Einsatz einer Glühmanschette im Biomassenheizkraftwerk Steyr; Abstützungen sind wegen des Festigkeitsverlustes erforderlich [118]



**Abbildung 6.2:** Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche Probe G03 [119]

Die dennoch geschweißten Proben zeigen aber, dass das Schweißen im Hinblick auf die Kerbschlagarbeit keinen negativen Einfluss hat.

Alle Proben lassen sich schweißen, ohne dass sich unverzüglich ein Riss an oder neben der Schweißnaht bildet.

Die Werte der Kerbschlagarbeit verschlechtern sich also bei den geschweißten Proben nicht. Bei einer normalgeglühten Probenreihe verbessern sich diese Werte sogar über die Anforderungen des Normwerkes hinaus. Eine normalgeglühte Probenreihe weist das eindrucksvoll nach. Hierzu gibt die Abbildung 6.2 auf S. 124 Auskunft.

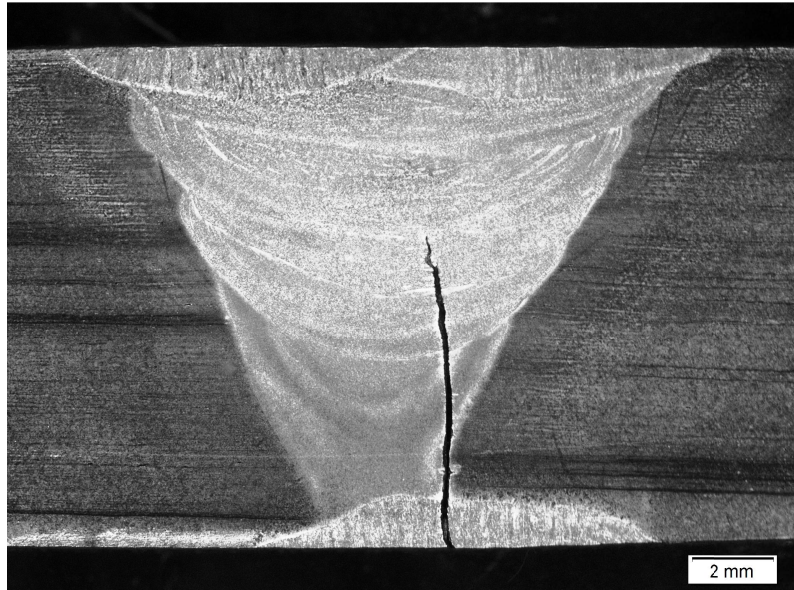
Wie lange aber diese positive Entwicklung anhält, ist nicht klar und muss weiter untersucht werden.

### 6.2.3 Einflussgröße Kerbe

Die Kerbe hat bei allen untersuchten Proben den größten Einfluss auf das Versagensverhalten. Da die erzielten Schwingbreiten denen der Norm entsprechen bzw. diese teilweise noch übertreffen, kann der maßgebliche Versagenseinfluss nur von der Kerbe stammen.

Ganz offensichtlich ist es so, dass die Kerbe den Bruch vorrangig beeinflusst. Als zweite Arbeitsthese für weitere Untersuchungen bedeutet das:

**Die Kerbe macht den Bruch, auch beim Reparaturschweißen von Altstahl.**



**Abbildung 6.3:** Bild von Probe G03-03 mit Beginn des Risses an einem inneren Fehler (Schlackeeinschluss); siehe auch Anlage A.8, S. 178 ff.

Im Umkehrschluss bedeutet das aber auch, dass derjenige, der die Kerbe (das Kerbdetail) genauestens berücksichtigt, mit einem sehr beanspruchbaren Dauerschwingverhalten rechnen darf.

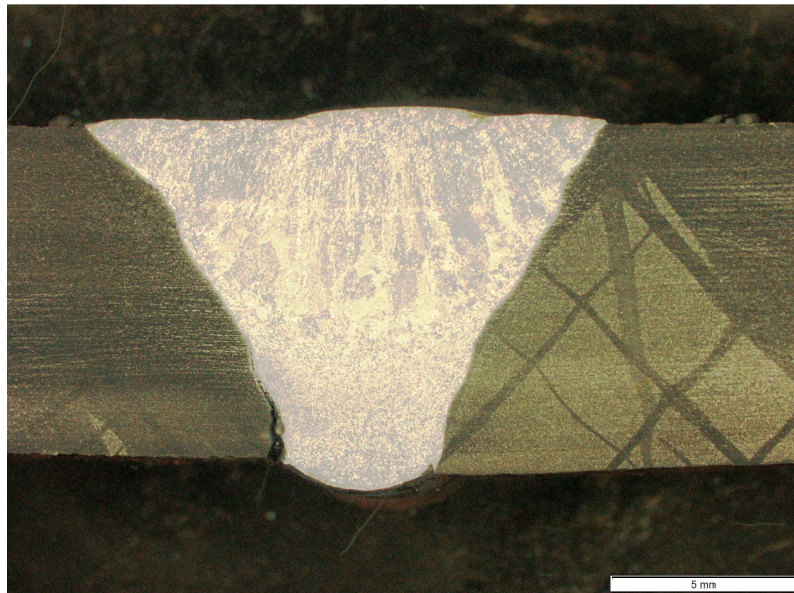
Bei allen untersuchten Proben wurde darauf geachtet, dass die untersuchten Werkstücke bis auf die Schweißnahtvorbereitung unbehandelt in die Prüfmaschinen eingebaut wurden. Die Proben waren also wie in situ teilweise mit Rostnarben bedeckt.

Die Rissinitiation geht entweder von einem inneren Schweißnahtfehler (siehe hierzu Abbildung 6.3, S. 125), einem Fehler am Nahtübergang (Abbildung 6.4, S. 126) oder einer Rostnarbe aus (Abbildung 6.5, Seite 126).

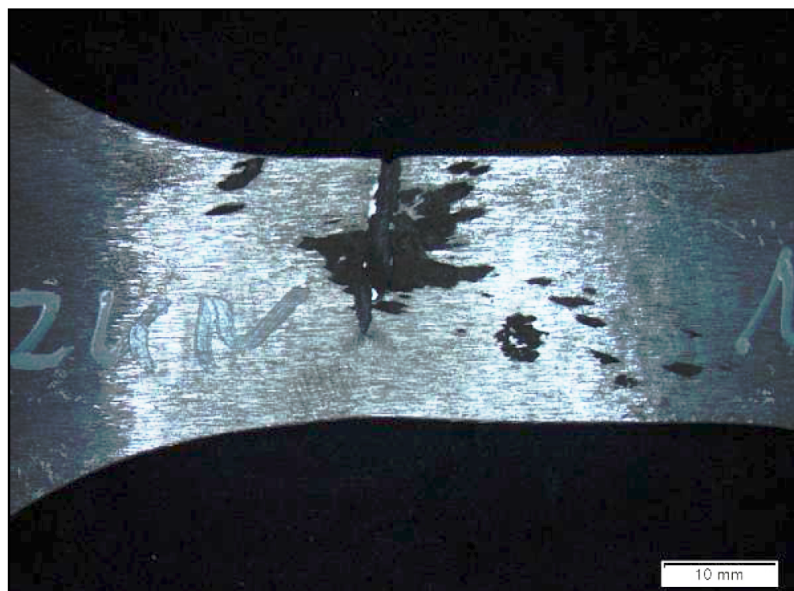
Die ersten beiden Schadensbilder sind durch die Schwingfälle abgedeckt, das letzte Schadensbild, Riss an der Rostnarbe, nicht.

Die FAT 160 für den Grundwerkstoff spricht von einem glatten Werkstoff, nicht von einem an- oder abgerosteten. Hier ist nach RIL 805.0201 [3, S. 12] der Kerbfall „Lochstab“ anzusetzen. Das entspricht etwa der FAT 90 nach EC 3 [13].





**Abbildung 6.4:** Bild von Probe G04-05 mit Beginn des Risses am Nahtübergang (Nahtanstiegsinkel); siehe auch Anlage A.16, S. 218 ff.



**Abbildung 6.5:** Rissausgang an einer Korrosionsnarbe im Grundwerkstoff (Draufsicht), Probe G04-01; siehe Anlage A.12, . 198 ff.; Abbildung entnommen aus [119]



#### **6.2.4 Einflussgröße Rostnarben**

Rost- oder auch Korrosionsnarben wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht gezielt untersucht. Im Rahmen der Schwingversuche der Grundwerkstoffe zeigte sich jedoch, dass die Rissinitiation stets von einer Rostnarbe ausgeht.

Im Nachweis der Betriebsfestigkeit „für ungelochte Bauteile mit mittleren bis tiefen Rostnarben bzw. mit Lochfraß“ muss von einem Lochstab ausgegangen werden [3, S. 12].

In Kenntnis dessen erscheint es sinnvoll, gegen diese Rostnarben vorzugehen. Das kann zum Beispiel durch Glaskugelperlstrahlen oder ein ähnliches Verfahren erzielt werden, das die Rostnarben – im Sinne der Betriebsfestigkeit sind das Kerben – egalisiert.

Eine nachfolgende Beschichtung mit einem Korrosionsschutzsystem ist erforderlich.

#### **6.2.5 Einflussgröße Schweißnahtnachbehandlung**

Die Nachbehandlung von Schweißnähten wird in dieser Arbeit ebenso wenig betrachtet wie die Problematik der Rostnarben.

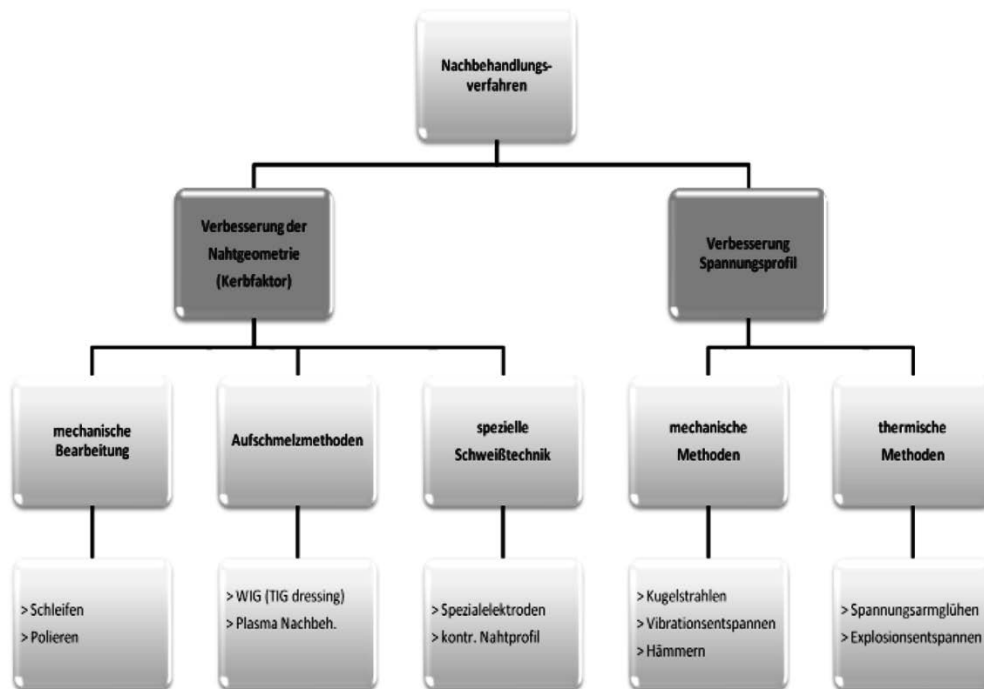
Jedoch darf nicht versäumt werden, darauf hinzuweisen, dass eine geeignete Nachbehandlung der Schweißnähte, die in sogenannte Altstähle eingebrannt werden, zu noch besseren Verhältnissen hinsichtlich der Eigenspannungen der Nähte führt.

Diese werden dadurch hinsichtlich ihrer Schwingfestigkeit aufgewertet, die Schwingbreite steigt an.

Abbildung 6.6, S. 128) zeigt die unterschiedlichen Möglichkeiten der Nachbehandlung von Schweißnähten.

Ein Beispiel hierfür ist das sogenannte PIT (Pneumatic Impact Treatment), das die Eigenspannungen in der Schweißnaht und im Übergangsbereich abmindert, indem künstlich Druckspannungen eingetragen werden. Es handelt sich hierbei um ein hochfrequentes Hämmern (HFH).

Weitere Informationen hierzu sind bei KUHLMANN, BERGMANN et al. [120] und bei GABRYS, BINDER et al. [121] zu finden.



**Abbildung 6.6:** Nachbehandlungsverfahren für Schweißnähte nach GERSTER [122]

### 6.3 Ausblick

Zurzeit ist das Thema der maroden Eisenbahn- und Straßenbrücken in aller Munde [123]. Mit den hier gewonnenen Erkenntnissen kann möglicherweise ein Beitrag dazu geleistet werden, Bauwerke zu erhalten und auf einen teuren Ersatzneubau vorerst zu verzichten.

In Zukunft werden die Kerbfälle intensiver und vor allem in größerer Zahl zu untersuchen sein.

Die Untersuchungen werden dabei auch auf das Phänomen der nach dem Schweißen verbesserten Kerbschlagarbeit auszudehnen sein.

Hierbei ist von besonderem Interesse, wie lange dieser sehr wünschenswerte Zustand der verbesserten Kerbschlagarbeit anhält.

Als weiteres Betätigungsfeld wird sich aber auch das der Anwendung im Bauwerk eröffnen.

Durch das Schweißen wird das Bauwerk repariert. Dabei wird Wärme eingetragen, die die betroffenen Bereiche normalglüht. Weiterhin wird der positive Effekt des Glühens auch an anderer Stelle im Bauwerk nutzbringend angewendet werden können.

Dazu müssen einerseits die Bauzustände mit Sicherungen, Abstützungen etc. betrachtet werden.

Andererseits muss die dafür notwendige Technik in ausreichender Menge vorhanden und in der Praxis anwendbar sein. Die Glühmanschetten, ihre Stromerzeuger und alles Zubehör müssen durch Arbeitskräfte in das Bauwerk hineingetragen werden können. Eine Brücke lässt sich eben doch nur akademisch in einen Glühofen schieben.



## Literatur

- [1] F. Lüddecke. *Ein Beitrag zur Ertüchtigung bestehender Stahltragwerke unter besonderer Berücksichtigung des Fügeverfahrens Schweißen*. Dissertation. Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft. Bremerhaven, 2006.
- [2] R. Helmerich. *Forschungsbericht 271: Alte Stähle und Stahlkonstruktionen. Materialuntersuchungen, Ermüdungsversuche an originalen Brückenträgern und Messungen von 1990 bis 2003*. Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft. Bremerhaven, 2005.
- [3] Deutsche Bahn AG, Hrsg. *Richtlinie 805: Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken*. Selbstverlag. Frankfurt am Main, 2010.
- [4] Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung Abteilung Straßenbau, Hrsg. *Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)*. Selbstverlag. Bonn, 2011.
- [5] ON Österreichisches Normungsinstitut, Hrsg. *ONR 24008: Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Eisenbahn- und Straßenbrücken*. Selbstverlag. Wien, 2006.
- [6] I-AM 08/2002. *Richtlinie für die Beurteilung von genieteten Eisenbahnbrücken*. Schweizerische Bundesbahnen SBB AG (SBB, CFF, FFS), 2002.
- [7] K. Geißler und W. Graße und K. Brandes. „Bewertung bestehender Stahlbrücken“. In: *Stahlbaukalender 2006*. Ernst & Sohn. Berlin, 2006, S. 485–548.
- [8] E. Wallerang. „Brücken alter Trassen halten dem Verkehr kaum stand“. In: *VDI nachrichten Nr. 27/28*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2013.
- [9] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN ISO 4063:2011-03: Schweißen und verwandte Prozesse. Liste der Prozesse und Ordnungsnummern. Korrigierte Fassung 2010-03-01*. Beuth Verlag. Berlin, 2011.
- [10] E. Damerow. *Die praktische Werkstoffabnahme in der Metallindustrie*. Springer-Verlag. Berlin, 1935.
- [11] A. Casu und R. Fregonese und A. Garro und P. Calderale. „Mechanisches Verhalten von Heißnietverbindungen in Abhängigkeit von Abkühlung und Creep“. In: *Stahlbau*. Ausgabe 66. Heft 5. Mai 1997. Ernst & Sohn. Berlin, 1997, S. 14–19.

- [12] D. Gross und T. Seelig. *Bruchmechanik. Mit einer Einführung in die Mikromechanik*. Springer-Verlag. Berlin, 2011.
- [13] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 1993-1-9:2010-12 (Eurocode 3): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-9: Ermüdung. Deutsche Fassung*. Beuth Verlag. Berlin, 2010.
- [14] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 1993-2:2010-12 (Eurocode 3): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 2: Stahlbrücken. Deutsche Fassung*. Beuth Verlag. Berlin, 2010.
- [15] Deutsche Bahn AG, Hrsg. *Richtlinie 804: Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instand halten*. Selbstverlag. Frankfurt am Main, 2003.
- [16] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN-Fachbericht 103. Stahlbrücken*. Beuth Verlag. Berlin, Wien, Zürich, 2009.
- [17] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN-Fachbericht 104. Verbundbrücken*. Beuth Verlag. Berlin, Wien, Zürich, 2009.
- [18] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN-Fachbericht 101. Einwirkungen auf Brücken*. Beuth Verlag. Berlin, Wien, Zürich, 2009.
- [19] A. Nussbaumer und H.-P. Günther. „Grundlagen und Erläuterungen der neuen Ermüdungsnachweise nach Eurocode 3“. In: *Stahlbaukalender 2006*. Ernst & Sohn. Berlin, 2006, S. 381–484.
- [20] R. Kindmann und M. Stracke. *Verbindungen im Stahl- und Verbundbau*. Ernst & Sohn. Berlin, 2010.
- [21] C. Seeßelberg. *Kranbahnen. Bemessung und konstruktive Gestaltung*. Bauwerk Verlag. Berlin, 2006.
- [22] Deutsche Bahn AG, Hrsg. *Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke (VEI)*. Selbstverlag. Frankfurt am Main, 2000.
- [23] H. Pasternak und A. Chwastek. „Zur Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für die Lebensdauer von Reparaturschweißungen. Teil 1: Stand der Technik“. In: *Bauingenieur*. Band 90. Februar 2015. Springer VDI-Verlag. Düsseldorf, 2015, S. 47–54.
- [24] H. Pasternak und A. Chwastek. „Zur Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für die Lebensdauer von Reparaturschweißungen. Teil 2: Ermittlung der Schwingfestigkeitsklassen“. In: *Bauingenieur*. Band 90. Juni 2015. Springer VDI-Verlag. Düsseldorf, 2015, S. 272–277.

- 
- [25] R. Möll. „Altstahlschweißen und Nieten am Eisernen Steg in Frankfurt am Main“. In: Stahlbau. Ausgabe 66. Heft 5. Mai 1997. Ernst & Sohn. Berlin, 1997, S. 1–11.
- [26] G. Steidl. „Schweißverhalten von Baustählen aus der Zeit von 1885 bis 1940“. In: Schweißen und Schneiden 24. DVS Media GmbH. Düsseldorf, 1972, S. 85–87.
- [27] M. Fischer und W. Lorenz. „100 Jahre U-Bahn in Deutschland. Konstruktive Bestandsaufnahme und messwertbasierte Tragwerksmodellierung eines Stahlviaduktes der Linie 1 in Berlin“. In: Stahlbau. Ausgabe 71. Heft 2. Februar 2002. Ernst & Sohn. Berlin, 2002, S. 88–96.
- [28] J. Schuster. *Forschungsantrag der SLV Halle: Einfluss des Reparaturschweißens auf vorwiegend ruhende und zyklische Beanspruchbarkeit von Konstruktionen und Bauteilkomponenten aus Altstahl*. SLV Halle. Selbstverlag. Halle (Saale), 2012.
- [29] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN 8528-1: Schweißbarkeit. Metallische Werkstoffe. Begriffe*. Beuth Verlag. Berlin, 1973.
- [30] M. Beckert und H. Herold. *Kompendium der Schweißtechnik Band 3. Eignung metallischer Werkstoffe zum Schweißen*. Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag. Düsseldorf, 2002.
- [31] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN 17100-01:1980-01: Allgemeine Baustähle. Gütenorm*. Beuth Verlag. Berlin, 1980.
- [32] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 10025:1991-01: Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen. Technische Lieferbedingungen. Deutsche Fassung EN 10025:1990*. Beuth Verlag. Berlin, 1991.
- [33] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 10025:1994-03: Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen. Technische Lieferbedingungen (enthält Änderung A1:1993). Deutsche Fassung EN 10025:1990*. Beuth Verlag. Berlin, 1994.
- [34] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 10025-1:2005-02: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen. Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen. Deutsche Fassung EN 10025-1:2004*. Beuth Verlag. Berlin, 2005.
- [35] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 10025-2:2005-04: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen. Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle. Deutsche Fassung EN 10025-2:2004*. Beuth Verlag. Berlin, 2005.
-

- [36] M. Blum. *Die Schweißverbindung in der Instandsetzung von Stahlbetonbauten und in der Erweiterung bzw. Ertüchtigung historischer Stahlbauten zu Stahlverbundbauten*. [Onlinezitat vom 29. März 2013]. URL: [http://dib.schiele-schoen.de/118/8695/2005\\_08\\_15/Die\\_Schweisssverbindung\\_in\\_der\\_Instandsetzung\\_von\\_Stahlbetonbauten\\_und\\_in\\_der\\_Erweiterung\\_bzw\\_Ertuechtigung\\_historischer\\_Stahlbauten\\_zu\\_Stahlverbundbauten.html](http://dib.schiele-schoen.de/118/8695/2005_08_15/Die_Schweisssverbindung_in_der_Instandsetzung_von_Stahlbetonbauten_und_in_der_Erweiterung_bzw_Ertuechtigung_historischer_Stahlbauten_zu_Stahlverbundbauten.html).
- [37] H. Pasternak. *Stahltragwerke im Industriebau*. Ernst & Sohn. Berlin, 2010.
- [38] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 10025-2:2005-04: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen. Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle. Deutsche Fassung*. Beuth Verlag. Berlin, 2005.
- [39] Anonymus. „Ueber die Streifen im Puddeleisen“. In: *Polytechnisches Journal*. Band 222. S. 396. 31. März 1876.
- [40] „Puddelofen“. In: *Meyers Konversationslexikon*. 4. Auflage. 1885 – 1892. Verlag des Bibliographischen Instituts. Leipzig und Wien, 1885 – 1892.
- [41] R. Zimmermann und K. Günther. *Metallurgie und Werkstofftechnik (Band 1)*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig, 1975.
- [42] Stahlinstitut VDEh und Wirtschaftsvereinigung Stahl, Hrsg. *Puddler bei der Arbeit*. [Onlinezitat vom 1. Mai 2013]. URL: [www.stahl-online.de/Deutsch/Stahlinstitut\\_VDEh/Geschichte\\_der\\_Eisenhuettentechnik/Geschichte\\_Teil2.php](http://www.stahl-online.de/Deutsch/Stahlinstitut_VDEh/Geschichte_der_Eisenhuettentechnik/Geschichte_Teil2.php).
- [43] A. Reiche. *Untersuchung der Mölichkeit zur Baukostenreduzierung durch eine datenbankgestützte, statistisch gesicherte Zustandsbewertung von metallischen Tragwerkskomponenten bei der Modernisierung von Altbauten in den neuen Bundesländern*. MFPA Leipzig. Leipzig, 2000.
- [44] G. Kuscher. *Sanierung alter Stahlkonstruktionen. Wann ist Altstahl schweißgeeignet?* Leipzig : Vortrag am 23.11.2012.
- [45] H. Greenwood. *Steel And Iron. Practice and theory of several methods pursued in their manufacture and of their treatment in the rolling mills, the forge, and the foundry*. Casell & Company. London, Paris, New York, 1884.
- [46] B. Beyer. *Vom Tiegelstahl zum Kruppstahl. Technik- und Unternehmensgeschichte der Gussstahlfabrik von Friedrich Krupp in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts*. Klartext-Verlag. Essen, 2007.
- [47] Akademischer Verein Hütte e.V. zu Berlin, Hrsg. *Hütte. Des Ingenieurs Taschenbuch. Band I*. Verlag Ernst & Sohn. Berlin, 1936.



- 
- [48] H. Bessemer. „Ueber Bessemer’s Fabrikation von schmiedebarem Eisen und Stahl ohne Brennmaterial.“ In: Zeitschrift für Bauwesen. Heft III - V. Seite 240-244, 1857.
- [49] A. Gruner. „Ueber das Frischen des Roheisens auf Schmiedeeisen und Stahl nach Bessemer’s Verfahren“. In: Polytechnisches Journal 1861. Band 161. Nr. XVII. S. 46-53, 1861.
- [50] W. Schötschel. *Einführung in die Metallurgie*. [Onlinezitat vom 2. Juni 2013]. URL: [www.zum.de/Faecher/Ch/Schoetschel/Metallkunde.pdf](http://www.zum.de/Faecher/Ch/Schoetschel/Metallkunde.pdf).
- [51] W. Küntscher und H. Kulke. *Baustähle der Welt. Band 1: Großbaustähle*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig, 1964.
- [52] Bundesverband Stahl, Hrsg. *Stahlproduktion in der Bundesrepublik Deutschland. E-Mail-Zusendung vom 3. Mai 2013*. Selbstverlag. Essen, 2013.
- [53] Bundesverband Stahl, Hrsg. *Bundesrepublik Deutschland. Entwicklung der Rohstahlerzeugung nach Herstellverfahren*. Selbstverlag. Essen, 2013.
- [54] J. Schuster und E. Schulze und W. Grutke und K. Buneß. *Altstähle und ihre Eignung zum Schmelzschweißen*. SLV Halle. Selbstverlag. Halle (Saale), 2013.
- [55] H.-J. Bargel und G. Schulze, Hrsg. *Werkstoffkunde*. Springer-Verlag. Berlin, 2005.
- [56] A. Ledebur. *Die Verarbeitung der Metalle auf mechanischem Wege. Lehrbuch der mechanisch-metallurgischen Technologie*. Vieweg & Sohn. Braunschweig, 1877.
- [57] B. Osann. *Lehrbuch der Eisenhüttenkunde. Band 2: Erzeugung und Eigenschaften des schmiedbaren Eisens*. Verlag von Wilhelm Engelmann. Leipzig, 1921.
- [58] P. Langenberg. *Bruchmechanische Sicherheitsanalyse anrißgefährdeter Bauteile im Stahlbau. Dissertation*. Selbstverlag. Aachen, 1996.
- [59] Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung, Hrsg. *Schadensanalyse an im Münsterland umgebrochenen Strommasten*. Selbstverlag. Berlin, 2006.
- [60] G. Thierauf. *Gutachten A 8232/05 zur Ermittlung der Schadensursache der am 25./26.11.2005 im westlichen Münsterland geschädigten Stahlgittermaste des Hoch- und Mittelspannungsnetzes*. Selbstverlag. Essen, 2006.
- [61] W. Baer. „Zur Alterung von Thomasstählen. Zusammenhänge, Mechanismen und Auswirkungen auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften“. In: MP Materials Testing. Bd. 49, 2007, S. 37–44.

- [62] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 1090-2:2011-10: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken. Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken. Deutsche Fassung.* Beuth Verlag. Berlin, 2011.
- [63] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 1993-1-1:2010-12 (Eurocode 3): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau. Deutsche Fassung.* Beuth Verlag. Berlin, 2010.
- [64] GSI Gesellschaft für Schweißtechnik International, Hrsg. *Internationaler Schweißfachingenieurlehrgang nach Richtlinie DVS-IIW 1170. Hauptgebiet 2: Werkstoffe und ihr Verhalten beim Schweißen.* Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag. Düsseldorf, 2009.
- [65] C. Petersen. *Stahlbau. Grundlagen der Berechnung und baulichen Durchbildung von Stahlbauten. 3., überarbeitete und verbesserte Auflage.* Vieweg-Verlag. Braunschweig, 1993.
- [66] Deutsche Fotothek und E. Nosko. *Serie: Industrieproduktion der DDR von 1967 bis 1984.* [Onlinezitat vom 4. Juni 2013]. 2013. URL: [www.deutsche-fotothek.de/obj87107872.htm](http://www.deutsche-fotothek.de/obj87107872.htm).
- [67] F. Schleicher. *Taschenbuch für Bauingenieure.* Springer-Verlag. Berlin, 1955.
- [68] Schweizer Verband für die Materialprüfungen der Technik, Hrsg. *Bericht Nr. 21. Diskussionsbericht Nr. 64 der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt. Härtekurs.* Selbstverlag. Baden, 1931.
- [69] F. Vincentz. *Kokille.* [Onlinezitat vom 2. Juni 2013]. URL: [www.commonswikimedia.org/wiki/File:3AHattingen\\_-\\_Henrichshuette\\_-\\_Schrottplatz\\_08\\_ies.jpg](http://www.commonswikimedia.org/wiki/File:3AHattingen_-_Henrichshuette_-_Schrottplatz_08_ies.jpg).
- [70] C. Petersen. *Stahlbau. Grundlagen der Berechnung und baulichen Durchbildung von Stahlbauten. 4. Auflage.* Springer Vieweg. Wiesbaden, 2013.
- [71] K. Wegener. *Werkstoffe und Fertigung I. Metalle. Erstarrung (Kristallisation).* [Onlinezitat vom 2. Juni 2013]. URL: [www.iwf.mavt.ethz.ch/education/lectures\\_HS/basicmaterial1/lectures\\_index](http://www.iwf.mavt.ethz.ch/education/lectures_HS/basicmaterial1/lectures_index).
- [72] W. Lorenz. *Bausystem und Tragwerk. Stahl.* [Onlinezitat vom 27. Mai 2013]. URL: [www.denkmalpraxismoderne.de/handbuch\\_stahl\\_lorenz.php](http://www.denkmalpraxismoderne.de/handbuch_stahl_lorenz.php).
- [73] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 10020:2000-03: Begriffsbestimmung für die Einteilung der Stähle. Deutsche Fassung.* Beuth Verlag. Berlin, 2000.

- 
- [74] R. Hubo und F. Schröter. „Stähle für den Stahlbau. Auswahl und Anwendung in der Praxis“. In: Stahlbaukalender 2001. Ernst & Sohn. Berlin, 2001, S. 545–589.
- [75] Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Hrsg. *Stahleisenwerkstoffblatt SEW 088. Schweißgeeignete Feinkornbaustähle*. Verlag Stahleisen. Düsseldorf, 1993.
- [76] Wirtschaftsvereinigung Stahl, Hrsg. *Rohstahlerzeugung in Deutschland nach Verfahren*. [Onlinezitat vom 4. Juni 2013]. URL: [www.stahl-online.de/Deutsch/Linke\\_Navigation/Stahl\\_in\\_Zahlen/Dokumente/Rohstahlerzeugung\\_in\\_Deutschland\\_nach\\_Verfahren\\_06022013.pdf](http://www.stahl-online.de/Deutsch/Linke_Navigation/Stahl_in_Zahlen/Dokumente/Rohstahlerzeugung_in_Deutschland_nach_Verfahren_06022013.pdf).
- [77] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 10164:2005-03: Stahlerzeugnisse mit verbesserten Verformungseigenschaften senkrecht zur Erzeugnisoberfläche. Technische Lieferbedingungen. Deutsche Fassung*. Beuth Verlag. Berlin, 2005.
- [78] N. Baule. *Einfluss des Reparaturschweißens auf vorwiegend ruhende und zyklische Beanspruchbarkeit von Konstruktionen und Bauteilkomponenten aus Altstählen*. Bachelorarbeit. Selbstverlag. Leipzig, 2013.
- [79] European Convention for Constructional Steelworks (ECCS), Hrsg. *Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life*. JRC Scientific und Technical Reports. Luxembourg, 2008.
- [80] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN 50125:2009-07: Prüfung metallischer Werkstoffe. Zugproben*. Beuth Verlag. Berlin, 2009.
- [81] H. Blumenauer. *Werkstoffprüfung*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig, 1994.
- [82] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 1993-1-10:2010-12 (Eurocode 3): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung. Deutsche Fassung*. Beuth Verlag. Berlin, 2010.
- [83] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN 1990:2010-12 (Eurocode 0): Grundlagen der Tragwerkplanung. Deutsche Fassung*. Beuth Verlag. Berlin, 2010.
- [84] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN ISO 148-6: Metallische Werkstoffe. Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy. Teil 1: Prüfverfahren (ISO 148-1:2009)*. Beuth Verlag. Berlin, 2011.
- [85] E. Macherauch und H.-W. Zoch. *Praktikum in Werkstoffkunde*. Vieweg + Teubner Verlag. Wiesbaden, 2011.

- [86] K. Roik. *Vorlesungen über Stahlbau*. Verlag Ernst & Sohn. Berlin, München, Düsseldorf, 1978.
- [87] J. Rudolph. *Zur rechnerischen Bauteil-Ermüdungsfestigkeit unter dem besonderen Aspekt der Schweißnahtnachbearbeitung. Habilitation*. Selbstverlag. Dortmund, 2003.
- [88] E. Haibach. *Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. 3. Auflage. Springer Verlag. Berlin, 2006.
- [89] C. Sonsino. „Dauerfestigkeit. Eine Fiktion.“ In: *Konstruktion*. Nr. 4, Bd. 57, 2005.
- [90] International Institute of Welding (IIW), Hrsg. *IIW Document IIW-1823-07 ex XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07. Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Selbstverlag. Paris, 2007.
- [91] G. Wagenknecht. *Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3. Band 2: Verbindungen und Konstruktionen*. Beuth Verlag. Berlin, 2011.
- [92] D. Radaj und M. Vormwald. *Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Ingenieure*. 3. Auflage. Springer Verlag. Berlin, 2007.
- [93] Deutsche Bundesbahn. Bundesbahndirektion München, Hrsg. *DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken. Ausgabe 1965*. Selbstverlag. München, 1965.
- [94] Deutsche Reichsbahn, Hrsg. *DV 848: Dienstvorschrift für geschweißte Eisenbahnbrücken*. Deutsche Reichsbahn Drucksachenverlag. Berlin, 1981.
- [95] European Convention for Constructional Steelworks (ECCS), Hrsg. *Good Design Practice. A Guideline for Fatigue Design*. Selbstverlag. Bruxelles, 2000.
- [96] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN 4131:1991-11: Antennentragwerke aus Stahl*. Beuth Verlag. Berlin, 1991.
- [97] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN 4133:1991-11: Schornsteine aus Stahl*. Beuth Verlag. Berlin, 1991.
- [98] K. Geißler. *Handbuch Brückenbau. Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung*. Ernst & Sohn. Berlin, 2014.
- [99] H. Tauscher. *Dauerfestigkeit von Stahl und Gußeisen. Werkstoffverhalten, Gestalteinfluß und Berechnungsgrundlagen*. VEB Fachbuchverlag. Leipzig, 1969.
- [100] J. W. Fisher. *Effect of weldments on the fatigue strength of steel beams. National Cooperative Highway Research Program Report 102*. Lehigh University. Bethlehem, Pennsylvania, 1970.

- 
- [101] International Institute of Welding (IIW), Hrsg. *IIW Document IIW-xxxx-13 ex XIII-2460-13/XV-1440-13. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. Draft for development*. Selbstverlag. Paris, 2013.
- [102] M. Kaßner. „Auslegung und Ausführung von geschweißten Stahltragwerken. Vergleich von europäischem und bisher national geltendem Regelwerk. Eurocode 3. DIN EN 1090. DIN 18800“. In: DVS-Berichte. Band 280. DVS Media Verlag. Düsseldorf, 2011.
- [103] J. Krebs und P. Hübner und M. Kaßner. „Eigenspannungseinfluss auf Schwingfestigkeit und Bewertung in geschweißten Bauteilen“. In: DVS-Berichte Band 234. DVS Media Verlag. Düsseldorf, 2004.
- [104] J. Krebs und M. Kaßner. „Influence of welding residual stresses on fatigue design of welded joints and components. IIW-Document XIII-2126-06/XV-1220-06“. In: *Welding in the World*. Vol. 51. No. 7/8-2007. Selbstverlag. Paris, 2007, S. 54–68.
- [105] B. Kühn. „E-Mail-Korrespondenz mit Prof. Dr.-Ing. Kühn, TH Mittelhessen. Vorsitzender der Europäischen Expertengruppe WG 6.1. Beurteilung bestehender Stahlbrücken. Gießen, 2014, bestätigte Protokolle als Anlage“.
- [106] J. Brozetti und M.A. Hirt und I. Ryan und G. Sedlacek und I.F.C. Smith. *Background Documentation Eurocode 3. Chapter 9 - Document 9.01. Background informations on Fatigue design rules. Statistical Evaluation. First Draft (V.1) ed.* Hrsg. von Centre Technique Industriel de la Construction Métallique und Ecole Polytechnique de Lausanne und University of Technology Aachen. 1989.
- [107] A. Martin und K. Hinkelmann und A. Esderts. „Zur Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen im Zeitfestigkeitsbereich. Teil 1: Wie zuverlässig können 50%-Wöhlerlinien aus experimentellen Daten geschätzt werden?“ In: *MP Materials Testing*. Bd. 53, 2011, S. 502–511.
- [108] A. Martin und K. Hinkelmann und A. Esderts. „Zur Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen im Zeitfestigkeitsbereich. Teil 2: Wie zuverlässig kann die Standardabweichung aus experimentellen Daten geschätzt werden?“ In: *MP Materials Testing*. Bd. 53, 2011, S. 513–521.
- [109] B. Kranz. *Einfluss der Nahtvorbereitung an der Nahtwurzel auf die Ermüdungsfestigkeit nicht durchgeschweißter Stumpfstoßverbindungen aus Baustahl. Dissertation*. Shaker Verlag. Aachen, 2009.
- [110] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN ISO 16269-6:2009-10: Statistische Auswertung von Daten. Teil 6: Ermittlung von statistischen Anteilsbereichen (ISO 16269-6:2005)*. Beuth Verlag. Berlin, 2009.

- [111] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *ISO 16269-6:2014-01: Statistische Auswertung von Daten. Teil 6: Ermittlung von statistischen Anteilsbereichen*. Beuth Verlag. Berlin, 2014.
- [112] R. Olivier und W. Ritter. *Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen. Teil 1: Stumpfstoß. Einheitliche statistische Auswertung von Ergebnissen aus Schwingfestigkeitsversuchen*. DVS Bericht Nr. 56/I. Deutscher Verlag für Schweißtechnik. Düsseldorf, 1979.
- [113] A. Hobbacher. *Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile*. IIW Doc. XIII-1539-96/XV-845-96. DVS-Verlag. Düsseldorf, 1997.
- [114] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN 4132: Kranbahnen. Stahltragwerke. Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung*. Beuth Verlag. Berlin, 1981.
- [115] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN ISO 2560:2010-03: Schweißzusätze. Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen. Einteilung (ISO 2560:2009). Deutsche Fassung EN ISO 2560:2009*. Beuth Verlag. Berlin, 2010.
- [116] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN ISO 5817:2014-06: Schweißen. Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen). Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (ISO 5817:2014). Deutsche Fassung EN ISO 5817:2014*. Beuth Verlag. Berlin, 2014.
- [117] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. *DIN EN ISO 6520-1:2007-11: Schweißen und verwandte Prozesse. Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen. Teil 1: Schmelzschweißen (ISO 6520-1:2007). Dreisprachige Fassung EN ISO 6520-1:2007*. Beuth Verlag. Berlin, 2007.
- [118] Anonymus. *Glühen einer Frischdampfleitung (Auslegungsparameter 545 °C 101 bar) aus dem Werkstoff P91; 1.4903; X10CrMoVNb9-1*. [Onlinezitat vom 8. Dezember 2015]. 2015. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Gl%C3%BChen#/media/File:Gl%C3%BChen\\_der\\_Frischdampfleitung\\_P91\\_Biomasseheizkraftwerk\\_Steyr.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Gl%C3%BChen#/media/File:Gl%C3%BChen_der_Frischdampfleitung_P91_Biomasseheizkraftwerk_Steyr.jpg).
- [119] C. Gajda. *Beurteilung des Einflusses einer schweißtechnischen Verarbeitung auf die Restlebensdauer von sogenannten Altstählen bei ausgewiesener Schweißeignung*. Bachelorarbeit. Selbstverlag. Leipzig, 2014.

- [120] U. Kuhlmann und J. Bergmann und A. Dürr und R. Thumser und H.-P. Günther und U. Gerth. „Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten höherfesten Baustählen durch Anwendung von Nachbehandlungsverfahren“. In: Stahlbau. Ausgabe 74. Heft 5. Mai 2005. Ernst & Sohn. Berlin, 2005, S. 358–365.
- [121] U. Gabrys und G. Binder und C. Kunz und H. Stahl. „Stahlwasserbau. Neue Entwicklungen“. In: Stahlbaukalender 2015. Ernst & Sohn. Berlin, 2015, S. 367–408.
- [122] P. Gerster. *Lebensdauererhöhung durch die Pneumatic Impact Technology (PIT) bei bestehenden und neuen Konstruktionen*. [Onlinezitat vom 13. Dezember 2015]. Selbstverlag SLV Mannheim. Mannheim, 2011. URL: <http://www.dvs-ma-lu.de/Downloads/Pneumatic-Impact-Technology.pdf>.
- [123] Deutscher Bundestag, Hrsg. *Dringender Sanierungsbedarf bei 221 Brücken von Bundesautobahnen und Bundesstraßen*. [Onlinezitat vom 20. Dezember 2015]. Deutscher Bundestag, 2013. URL: [https://www.bundestag.de/presse/hib/2013\\_01/01/251760](https://www.bundestag.de/presse/hib/2013_01/01/251760).





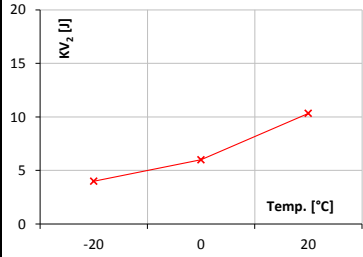
## **A Anlagen**

### **A.1 Probe G01-01**

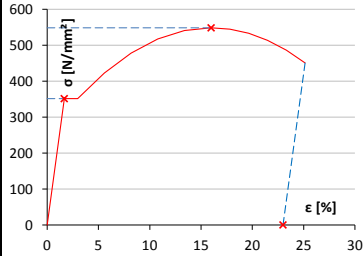
Probe Nr.:	G01-01
Herkunft:	Kettenglied Schleusenketten / ungeschweißt / FAT 160

Chemie	Chemische Zusammensetzung [Massen-%]						
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,300	0,280	0,560	0,085	0,028	0,027	0,017
2	0,280	0,260	0,530	0,068	0,021	0,001	0,014
3	0,290	0,280	0,550	0,082	0,033	0,034	0,011
Im Mittel	0,290	0,273	0,547	0,078	0,027	0,021	0,014

Stahl	Thomasstahl (N), beruhigt oder sonderberuhigt (Si, Al)
-------	--

Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]				
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>	
1	4	6	11		
2	4	6	9		
3	4	6	11		
Im Mittel	4	6	10		

Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden
-------	---

Mechanik	Mechanische Kennwerte				
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]	
1	387	589	39	22	
2	342	533	43	22	
3	325	523	51	25	
Im Mittel	351	548	44	23	

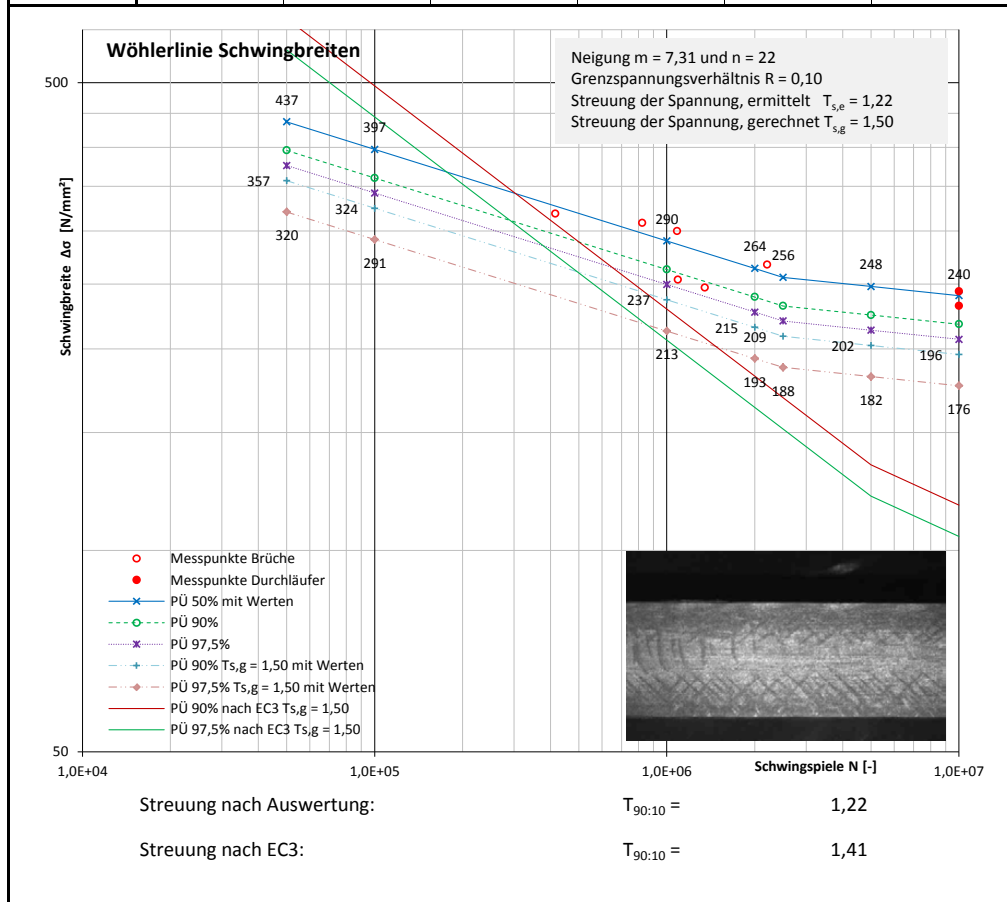
Stahl	annähernd S355 mit R <sub>eH</sub> ≈ 355 N/mm² und R <sub>m</sub> ≥ 490 N/mm²
-------	---

<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C

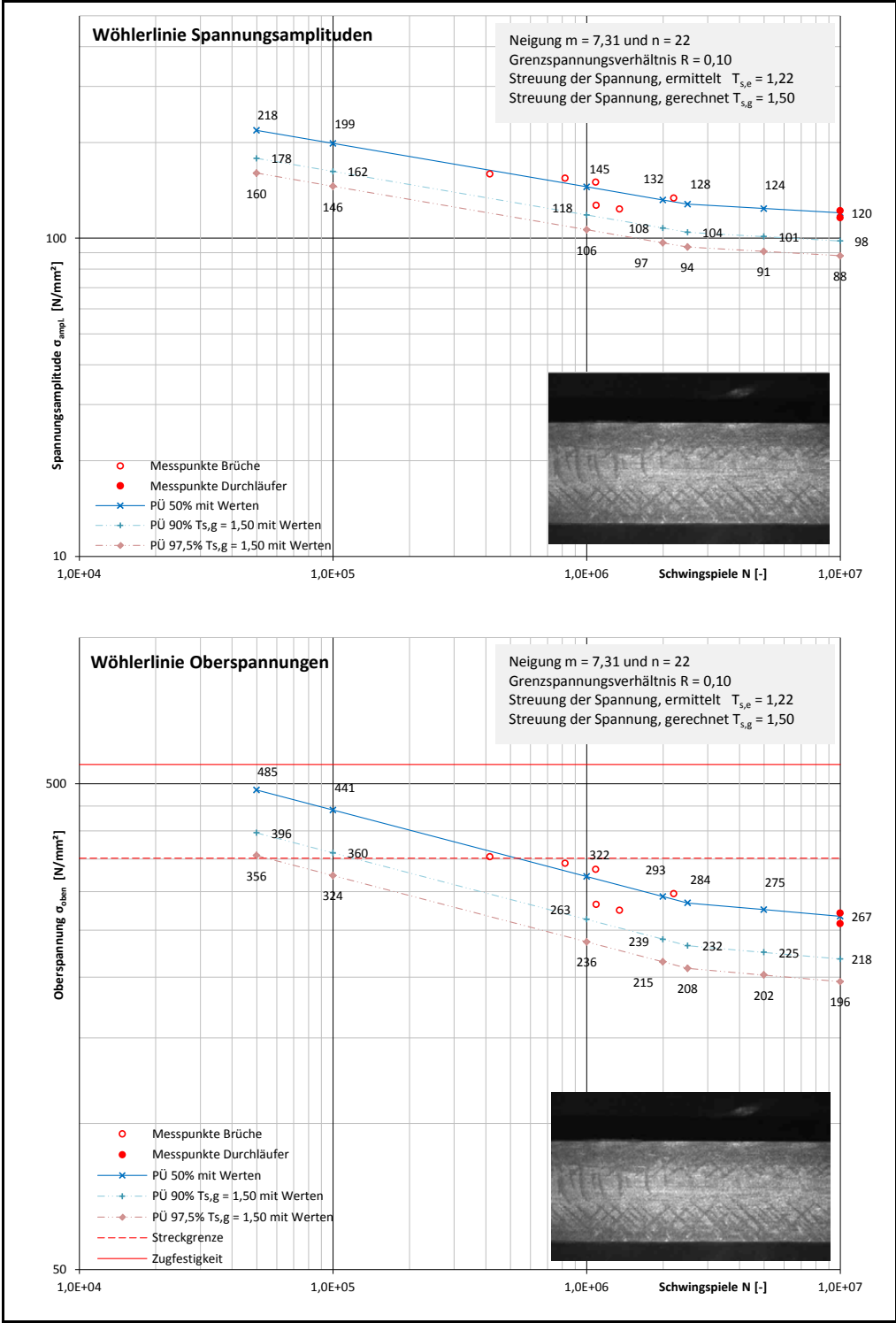
SLV Halle: ZP-215-605-12-001+01

Probe Nr.:	G01-01
Herkunft:	Kettenglied Schleusenketten / ungeschweißt / FAT 160

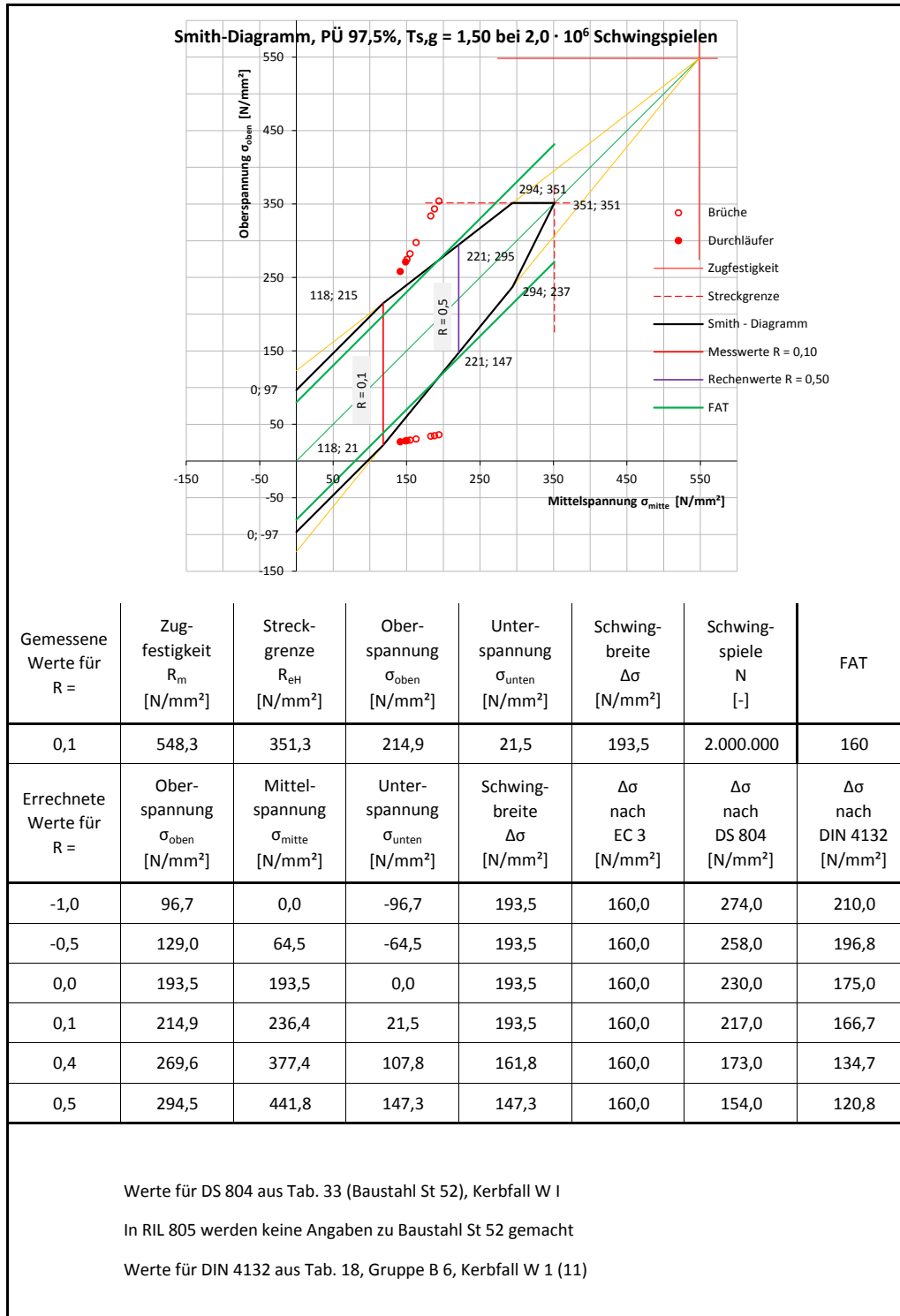
Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis R = 0,10			
	Grundmaterial, unbehandelt, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie m = 7,31			
			Abknickpunkt bei N <sub>B</sub> = 2,50E+06			
Bez.	Ober- spannung σ <sub>oben</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung σ <sub>mitte</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung σ <sub>unten</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude σ <sub>ampl.</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite Δσ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	274,4	150,9	27,4	123,5	247,0	1.350.999
2	333,3	183,3	33,3	150,0	300,0	1.086.168
3	353,7	194,5	35,4	159,2	318,3	415.979
4	342,8	188,5	34,3	154,3	308,5	824.019
5	282,0	155,1	28,2	126,9	253,8	1.092.553
6	257,7	141,7	25,8	116,0	231,9	10.000.000
7	270,9	149,0	27,1	121,9	243,8	10.000.000
8	297,0	163,4	29,7	133,7	267,3	2.207.250



Probe Nr.:	G01-01
Herkunft:	Kettenglied Schleusenkette / ungeschweißt / FAT 160



Probe Nr.:	G01-01
Herkunft:	Kettenglied Schleusenketten / ungeschweißt / FAT 160

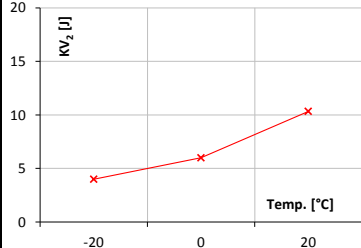


## **A.2 Probe G01-02**

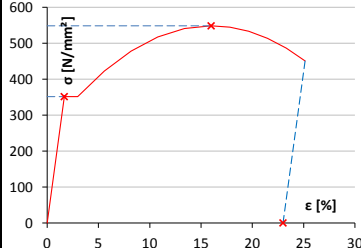
Probe Nr.:	G01-02
Herkunft:	Kettenglied Schleusenketten / geschweißt / FAT 90

Chemie	Chemische Zusammensetzung [Massen-%]						
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,290	0,280	0,560	0,085	0,028	0,027	0,017
2	0,280	0,260	0,530	0,068	0,021	0,001	0,014
3	0,290	0,280	0,550	0,082	0,033	0,034	0,011
Im Mittel	0,287	0,273	0,547	0,078	0,027	0,021	0,014

Stahl	Thomasstahl (N), beruhigt oder sonderberuhigt (Si, Al)
-------	--

Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]				
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>	
1	4	6	11		
2	4	6	9		
3	4	6	11		
Im Mittel	4	6	10		

Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden
-------	---

Mechanik	Mechanische Kennwerte				
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]	
1	387	589	39	22	
2	342	533	43	22	
3	325	523	51	25	
Im Mittel	351	548	44	23	

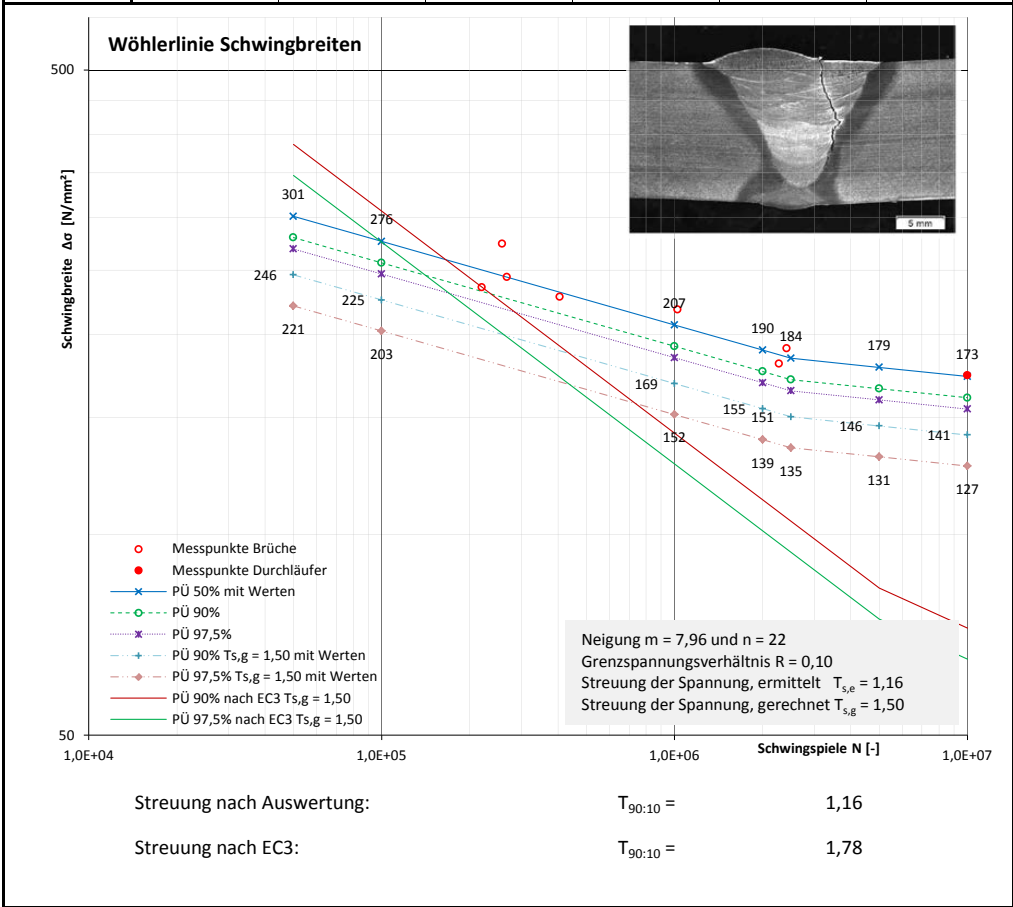
Stahl	annähernd S355 mit R <sub>eH</sub> ≈ 355 N/mm <sup>2</sup> und R <sub>m</sub> ≥ 490 N/mm <sup>2</sup>
-------	---

<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C

SLV Halle: ZP-215-605-12-001+01

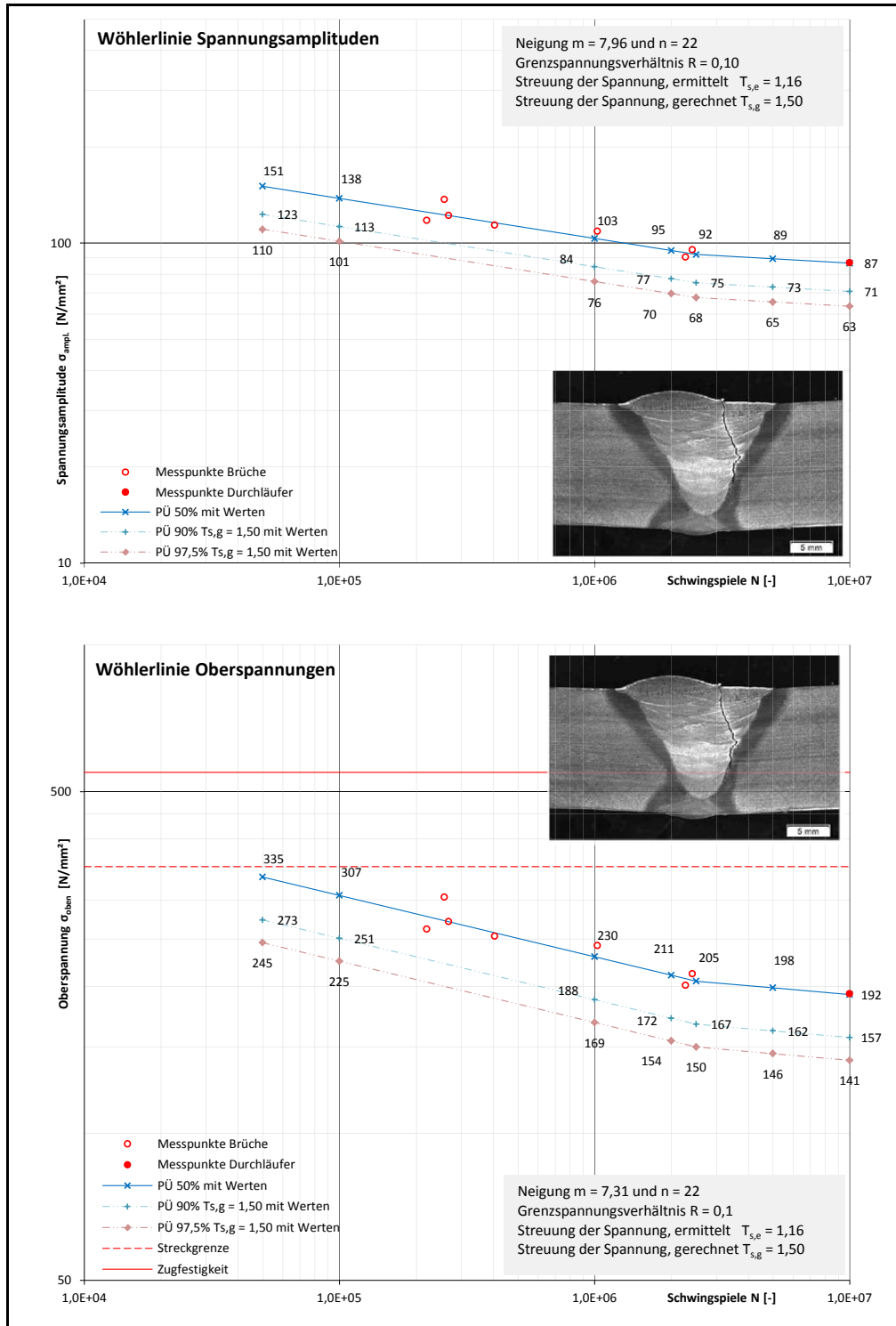
Probe Nr.:	G01-02
Herkunft:	Kettenglied Schleusenketten / geschweißt / FAT 90

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis		R =	0,10
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 90		Neigung der Wöhlerlinie		m =	7,96
			Abknickpunkt bei		N <sub>B</sub> =	2,50E+06
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{\text{oben}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{\text{mitte}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{\text{unten}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{\text{ampl.}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	304,2	167,3	30,4	136,9	273,8	258.004
2	242,2	133,2	24,2	109,0	218,0	1.026.351
3	211,9	116,5	21,2	95,4	190,7	2.416.748
4	271,1	149,1	27,1	122,0	244,0	268.009
5	200,8	110,4	20,1	90,4	180,7	2.275.030
6	261,7	143,9	26,2	117,8	235,5	220.046
7	193,0	106,2	19,3	86,9	173,7	10.000.000
8	253,1	139,2	25,3	113,9	227,8	406.360

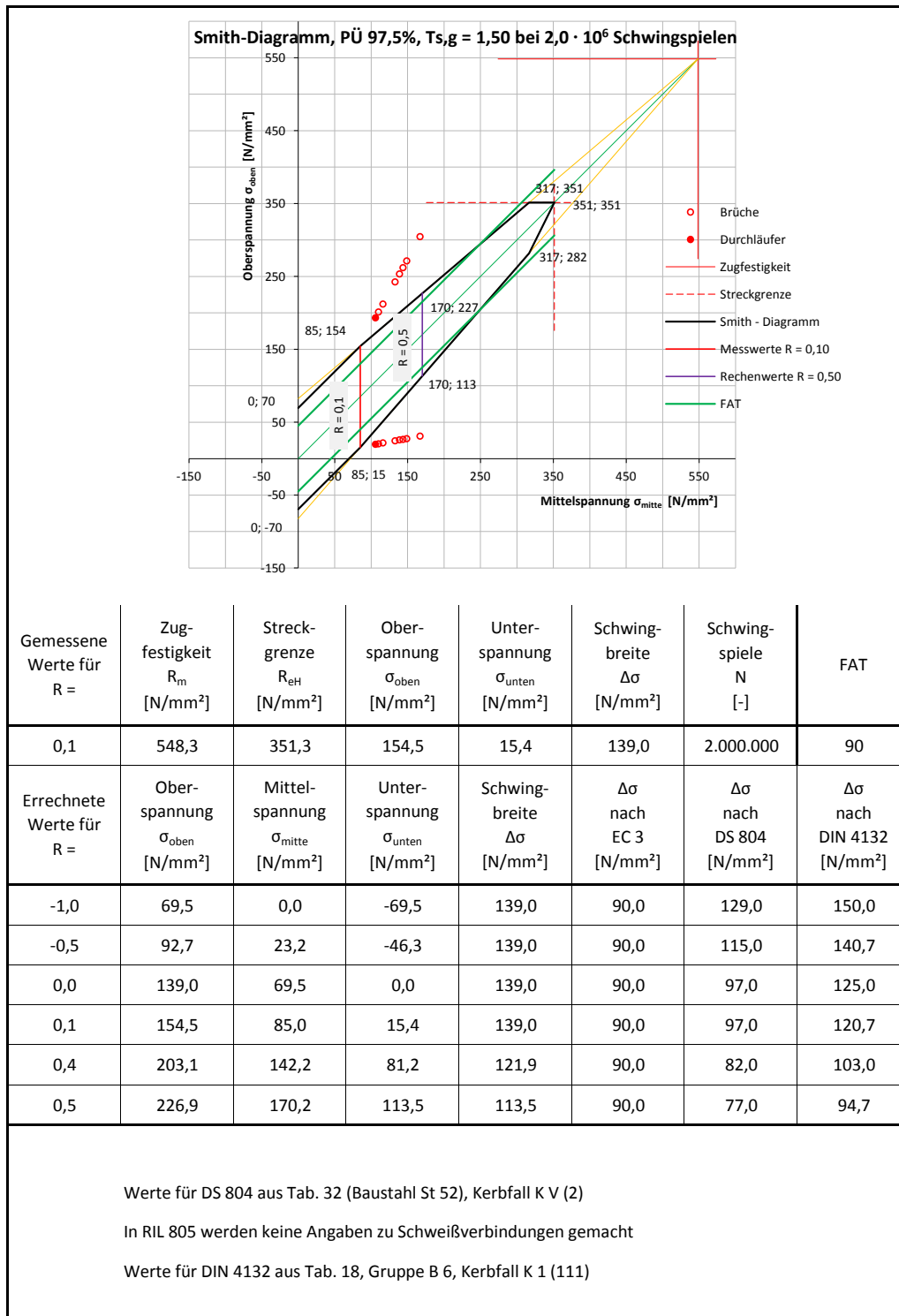




Probe Nr.:	G01-02
Herkunft:	Kettenglied Schleusenketten / geschweißt / FAT 90



Probe Nr.:	G01-02
Herkunft:	Kettenglied Schleusenketten / geschweißt / FAT 90

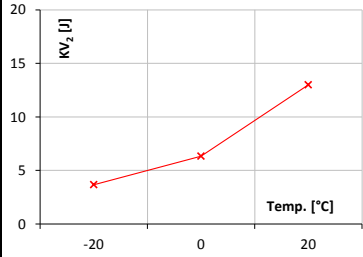


### **A.3 Probe G02-01**

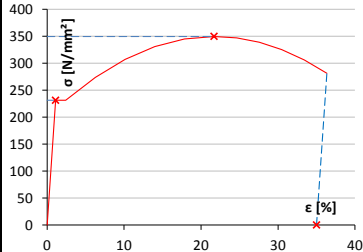
Probe Nr.:	G02-01
Herkunft:	HE-B 160 Verbandsstab / Steg / ungeschweißt / FAT 160

Chemie	Chemische Zusammensetzung [Massen-%]						
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,060	0,010	0,560	0,043	0,024	0,001	0,006
2	0,050	0,010	0,560	0,042	0,024	0,001	0,005
3	0,050	0,000	0,550	0,048	0,023	0,001	0,005
Im Mittel	0,053	0,007	0,557	0,044	0,024	0,001	0,005

Stahl	Siemens-Martin-Stahl (N), unberuhigt (Si, Al)
-------	---

Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]				
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>	
1	4	5	13		
2	4	7	17		
3	3	7	9		
Im Mittel	4	6	13		

Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden
-------	---

Mechanik	Mechanische Kennwerte				
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]	
1	230	353	70	35	
2	232	346	72	35	
3					
Im Mittel	231	350	71	35	

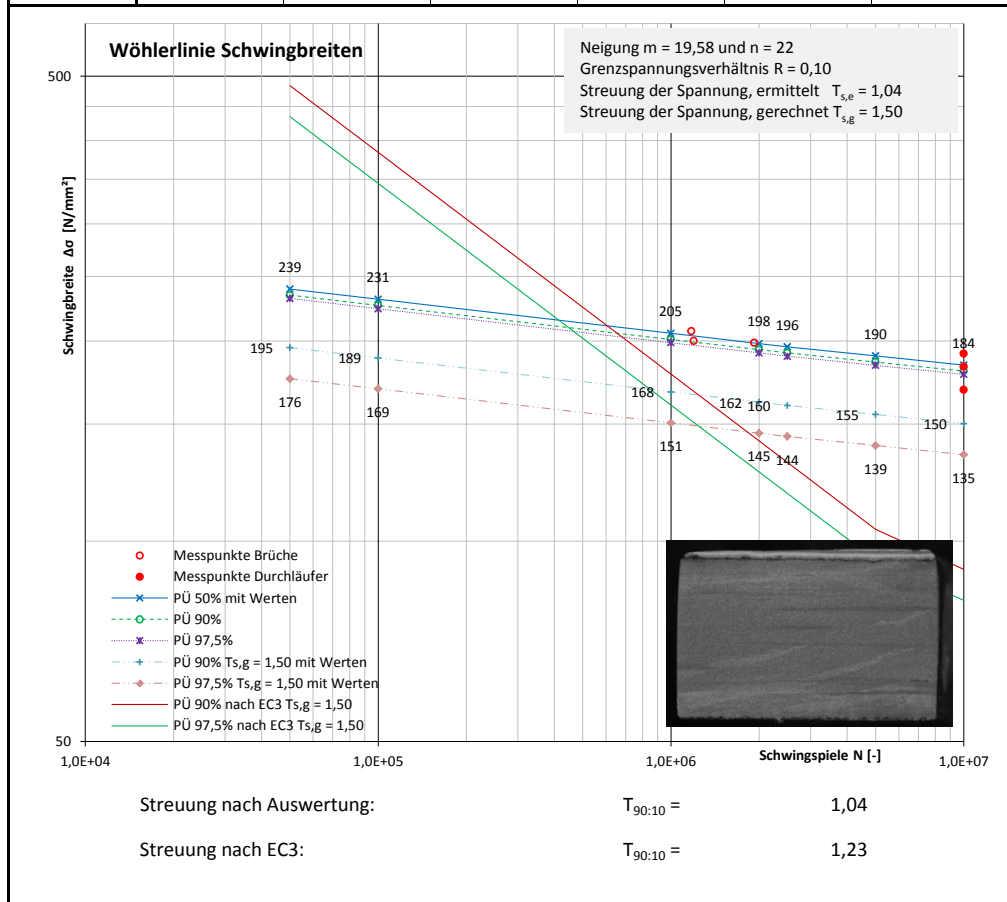
Stahl	annähernd S235 mit R <sub>eH</sub> ≈ 235 N/mm² und R <sub>m</sub> ≈ 360 N/mm²
-------	---

<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C

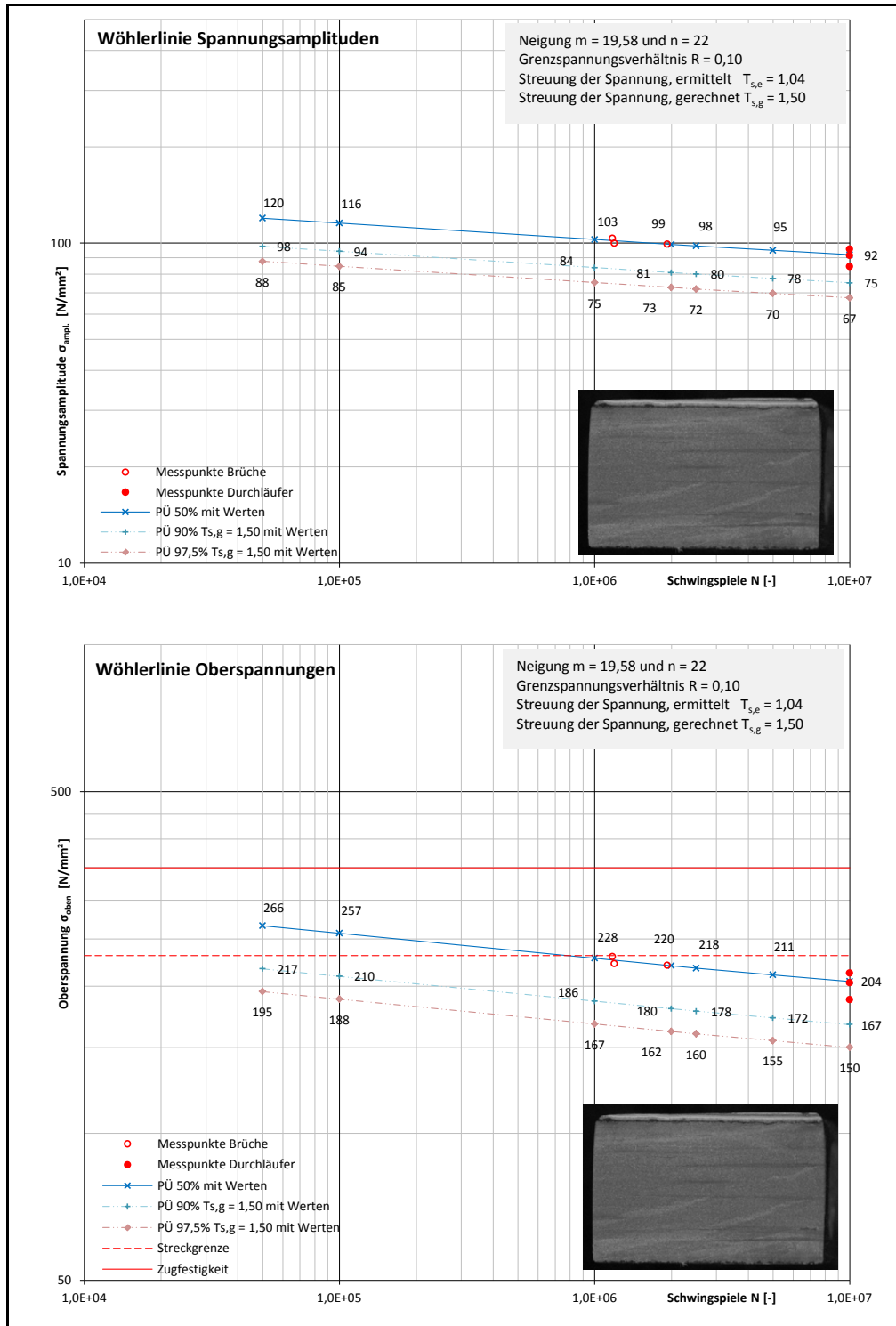
SLV Halle: ZP-215-605-12-001+01

Probe Nr.:	G02-01
Herkunft:	HE-B 160 Verbandsstab / Steg / ungeschweißt / FAT 160

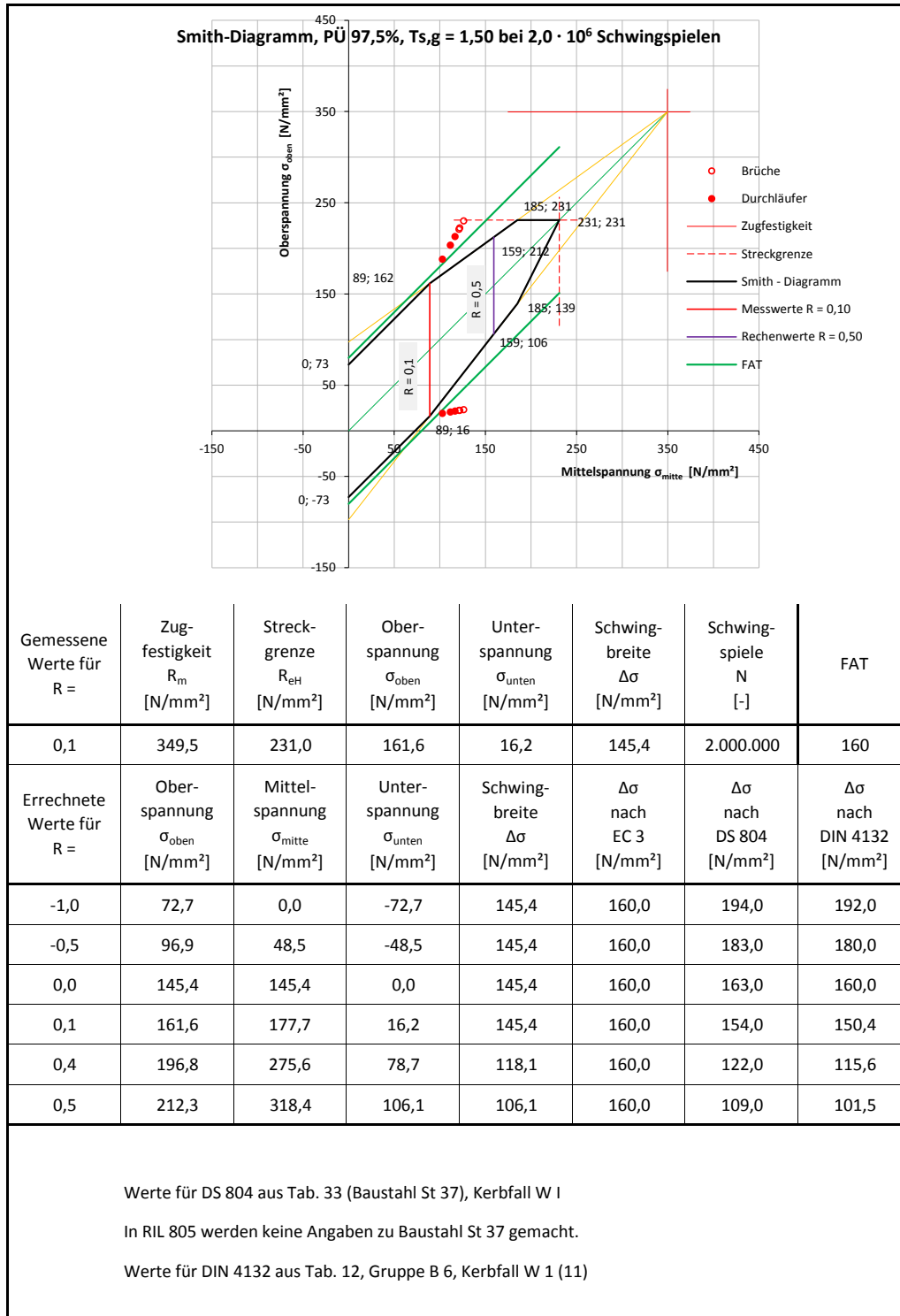
Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis $R =$		0,10	
	Grundmaterial, unbehandelt, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie $m =$		19,58	
			Abknickpunkt bei $N_B =$		2,50E+06	
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele $N$ [-]
1	222,2	122,2	22,2	100,0	200,0	1.197.028
2	229,9	126,4	23,0	103,5	206,9	1.175.394
3	220,7	121,4	22,1	99,3	198,6	1.925.642
4	187,7	103,2	18,8	84,5	168,9	10.000.000
5	203,3	111,8	20,3	91,5	183,0	10.000.000
6	212,7	117,0	21,3	95,7	191,4	10.000.000
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0



Probe Nr.:	G02-01
Herkunft:	HE-B 160 Verbandsstab / Steg / ungeschweißt / FAT 160



Probe Nr.:	G02-01
Herkunft:	HE-B 160 Verbandsstab / Steg / ungeschweißt / FAT 160



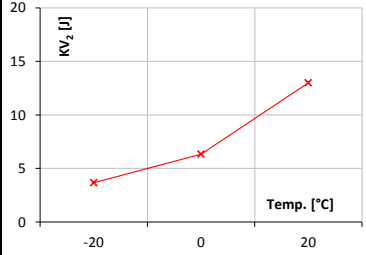
## **A.4 Probe G02-02**



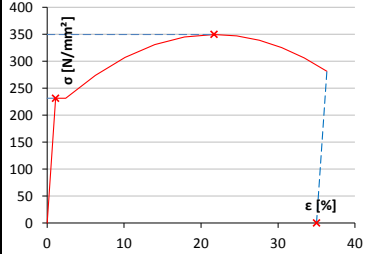
Probe Nr.:	G02-02
Herkunft:	HE-B 160 Verbandsstab / Gurt / ungeschweißt / FAT 160

Chemie	Chemische Zusammensetzung [Massen-%]						
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,060	0,010	0,560	0,043	0,024	0,001	0,006
2	0,050	0,010	0,560	0,042	0,024	0,001	0,005
3	0,050	0,000	0,550	0,048	0,023	0,001	0,005
Im Mittel	0,053	0,007	0,557	0,044	0,024	0,001	0,005

Stahl	Siemens-Martin-Stahl (N), unberuhigt (Si, Al)
-------	---

Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]				
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>	
1	4	5	13		
2	4	7	17		
3	3	7	9		
Im Mittel	4	6	13		

Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden
-------	---

Mechanik	Mechanische Kennwerte				
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]	
1	230	353	70	35	
2	232	346	72	35	
3					
Im Mittel	231	350	71	35	

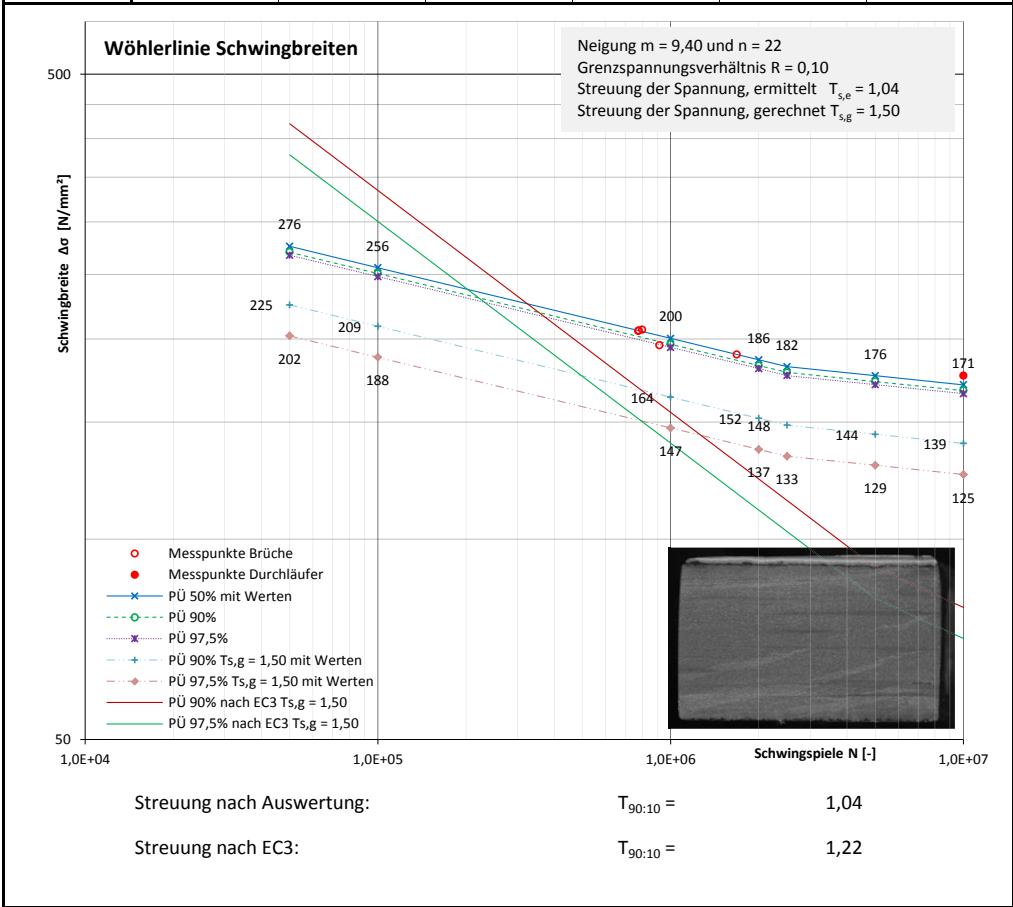
Stahl	annähernd S235 mit R <sub>eH</sub> ≈ 235 N/mm² und R <sub>m</sub> ≈ 360 N/mm²
-------	---

<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C

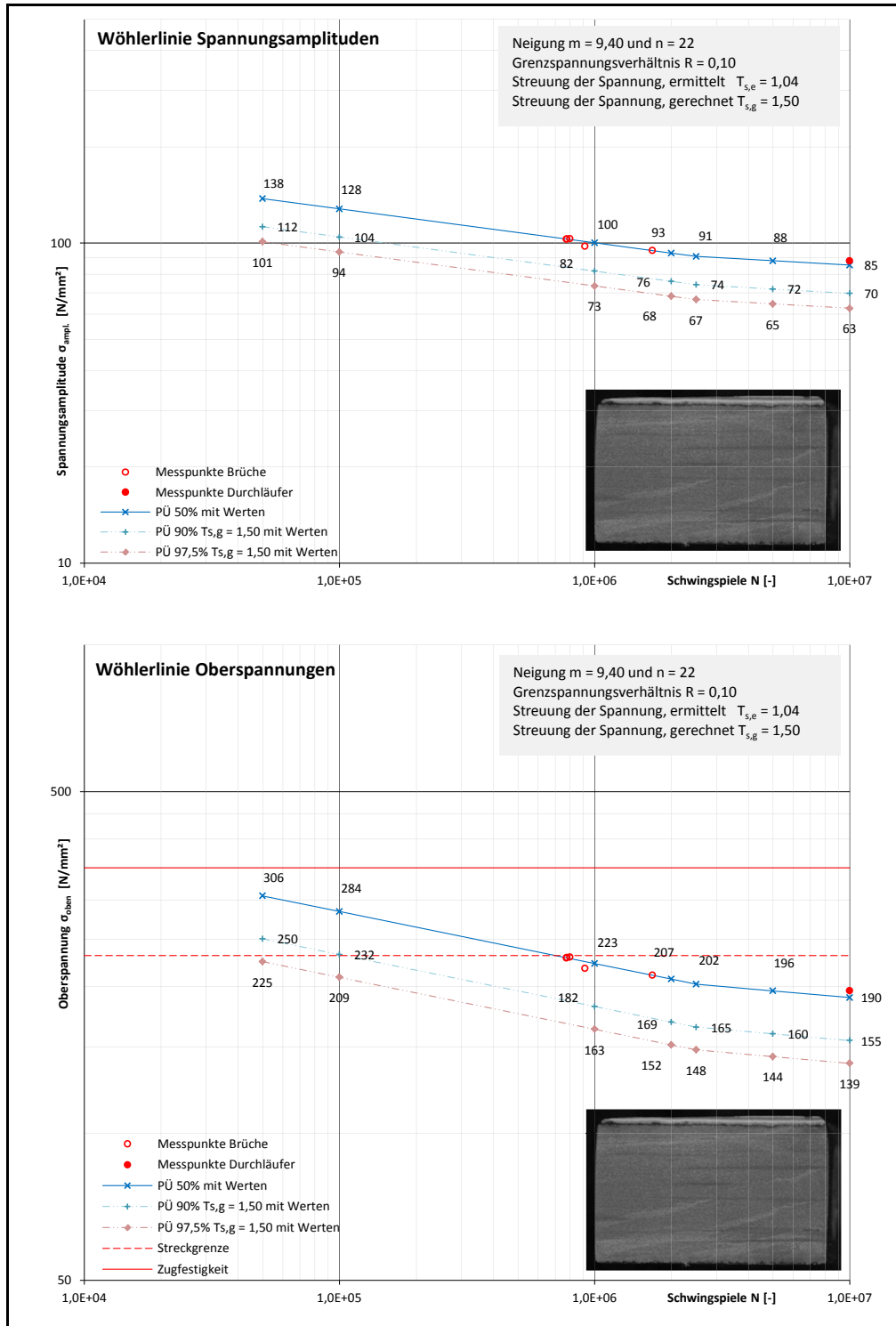
SLV Halle: ZP-215-605-12-001+01

Probe Nr.:	G02-02
Herkunft:	HE-B 160 Verbandsstab / Gurt / ungeschweißt / FAT 160

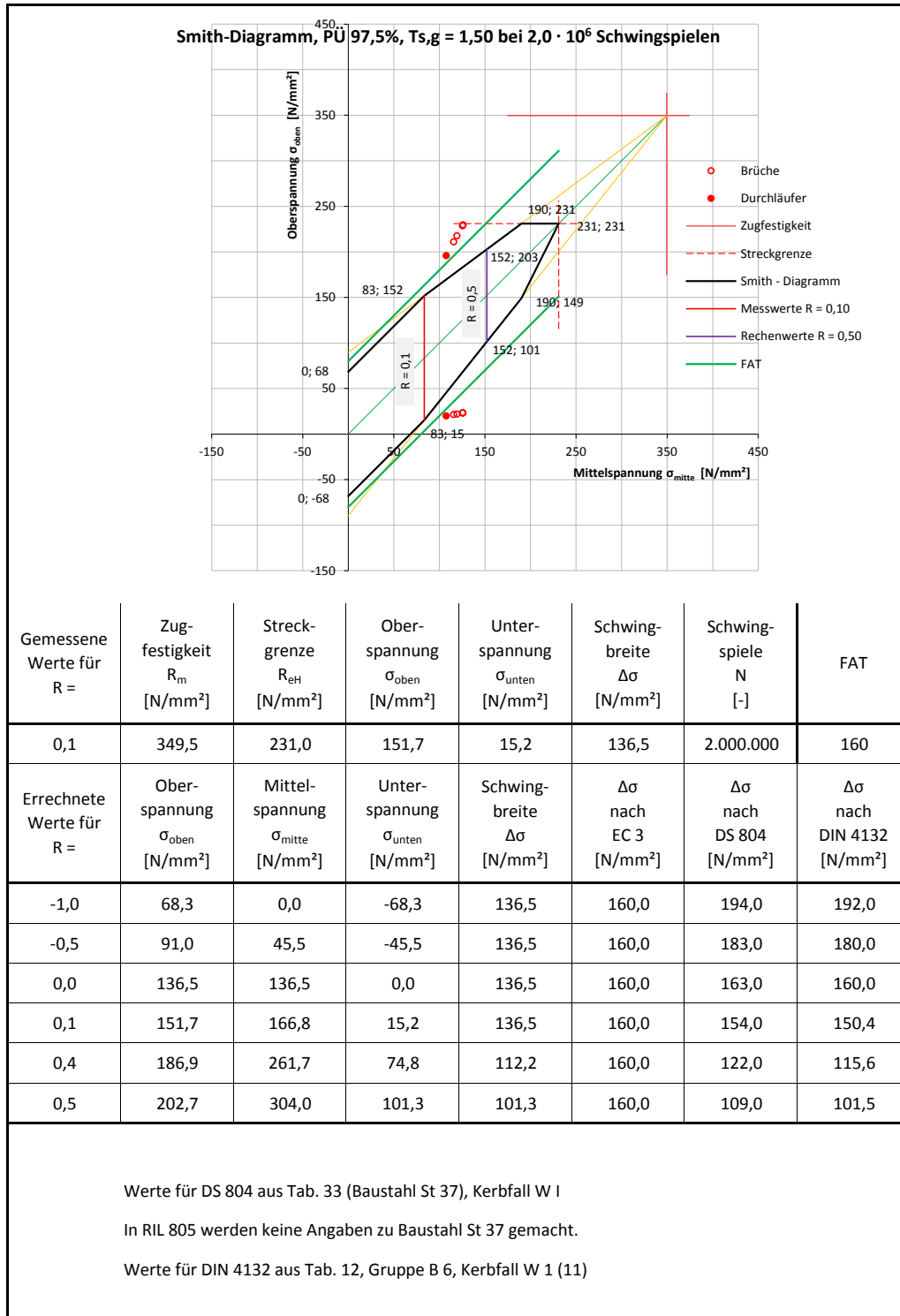
Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis $R =$		0,10	
	Grundmaterial, unbehandelt, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie $m =$		9,40	
			Abknickpunkt bei $N_B =$		2,50E+06	
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	228,8	125,8	22,9	103,0	205,9	779.782
2	217,4	119,6	21,7	97,8	195,7	916.784
3	210,6	115,8	21,1	94,8	189,5	1.685.462
4	229,4	126,2	22,9	103,2	206,5	800.867
5	228,4	125,6	22,8	102,8	205,6	776.551
6	195,7	107,6	19,6	88,1	176,1	10.000.000
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0



Probe Nr.:	G02-02
Herkunft:	HE-B 160 Verbandsstab / Gurt / ungeschweißt / FAT 160



Probe Nr.:	G02-02
Herkunft:	HE-B 160 Verbandsstab / Gurt / ungeschweißt / FAT 160

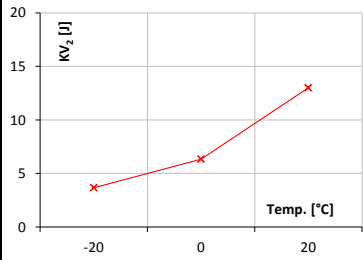


## **A.5 Probe G02-03**

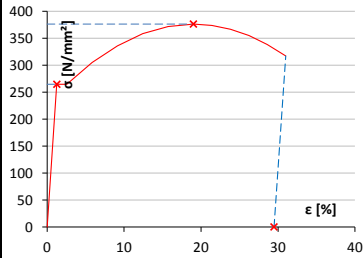
Probe Nr.:	G02-03
Herkunft:	HE-B 160 Verbandsstab / Gurt / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160

Chemie	Chemische Zusammensetzung [Massen-%]						
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,060	0,010	0,560	0,043	0,024	0,001	0,006
2	0,050	0,010	0,560	0,042	0,024	0,001	0,005
3	0,050	0,000	0,550	0,048	0,023	0,001	0,005
Im Mittel	0,053	0,007	0,557	0,044	0,024	0,001	0,005

Stahl	Siemens-Martin-Stahl (N), unberuhigt (Si, Al)
-------	---

Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]				
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>	
1	4	5	13		
2	4	7	17		
3	3	7	9		
Im Mittel	4	6	13		

Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden
-------	---

Mechanik	Mechanische Kennwerte				
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]	
1	263	374	70	33	
2	266	378	71	26	
3					
Im Mittel	265	376	71	30	

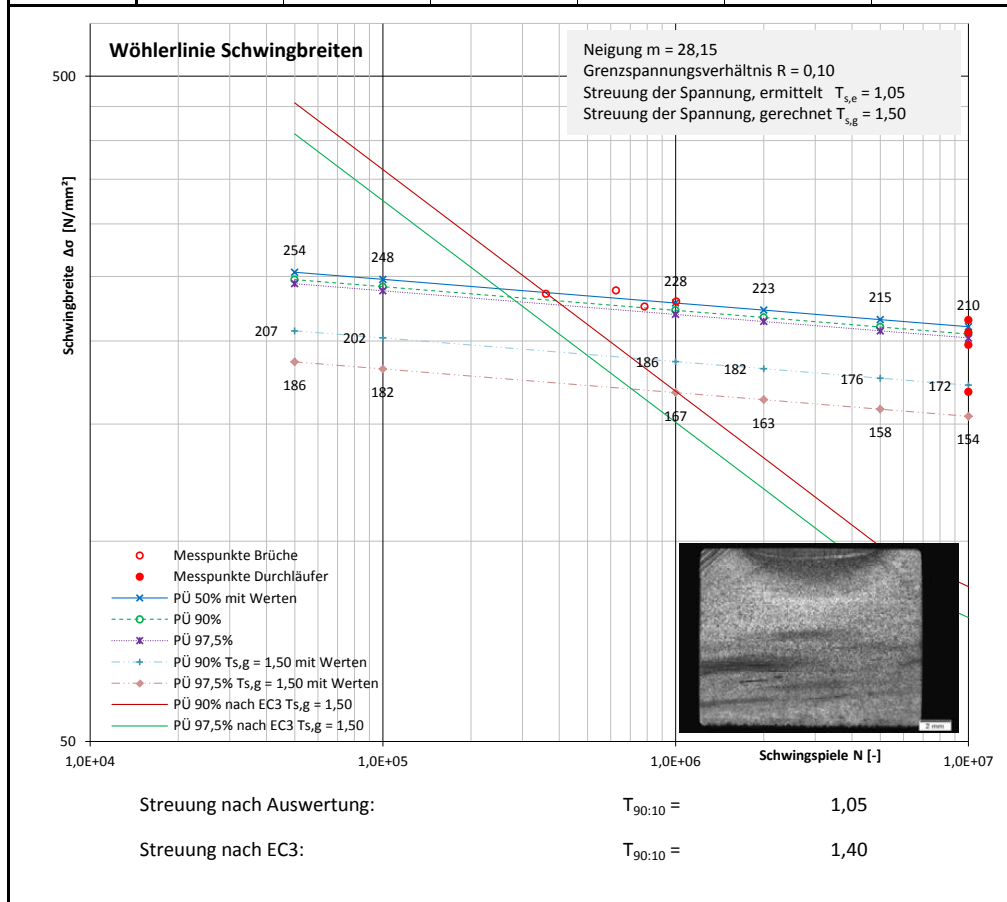
Stahl	besser als S235 mit R <sub>eH</sub> = 265 N/mm² und R <sub>m</sub> = 376 N/mm² - die Werte haben sich verbessert!
-------	---

<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C

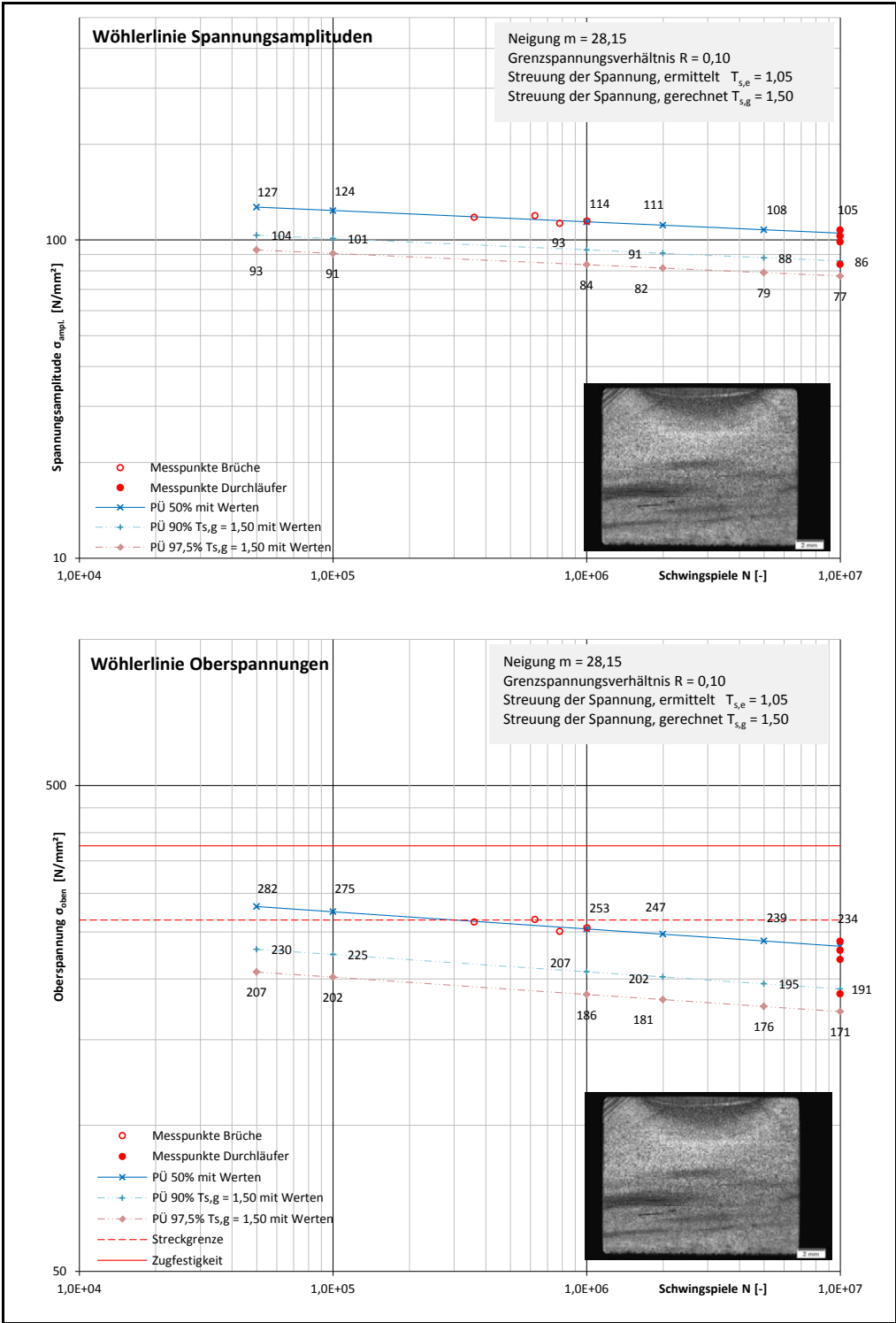
SLV Halle: ZP-215-605-12-001+01

Probe Nr.:	G02-03
Herkunft:	HE-B 160 Verbandsstab / Gurt / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis		R =	
	Grundmaterial, Auftragsraupe, Abschleiß, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie		m =	
			Abknickpunkt bei		$N_B =$	
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	261,5	143,8	26,2	117,7	235,4	360.881
2	254,6	140,0	25,5	114,6	229,1	1.005.675
3	264,7	145,6	26,5	119,1	238,2	626.210
4	250,3	137,7	25,0	112,6	225,3	784.496
5	186,2	102,4	18,6	83,8	167,6	10.000.000
6	219,1	120,5	21,9	98,6	197,2	10.000.000
7	228,7	125,8	22,9	102,9	205,8	10.000.000
8	238,9	131,4	23,9	107,5	215,0	10.000.000

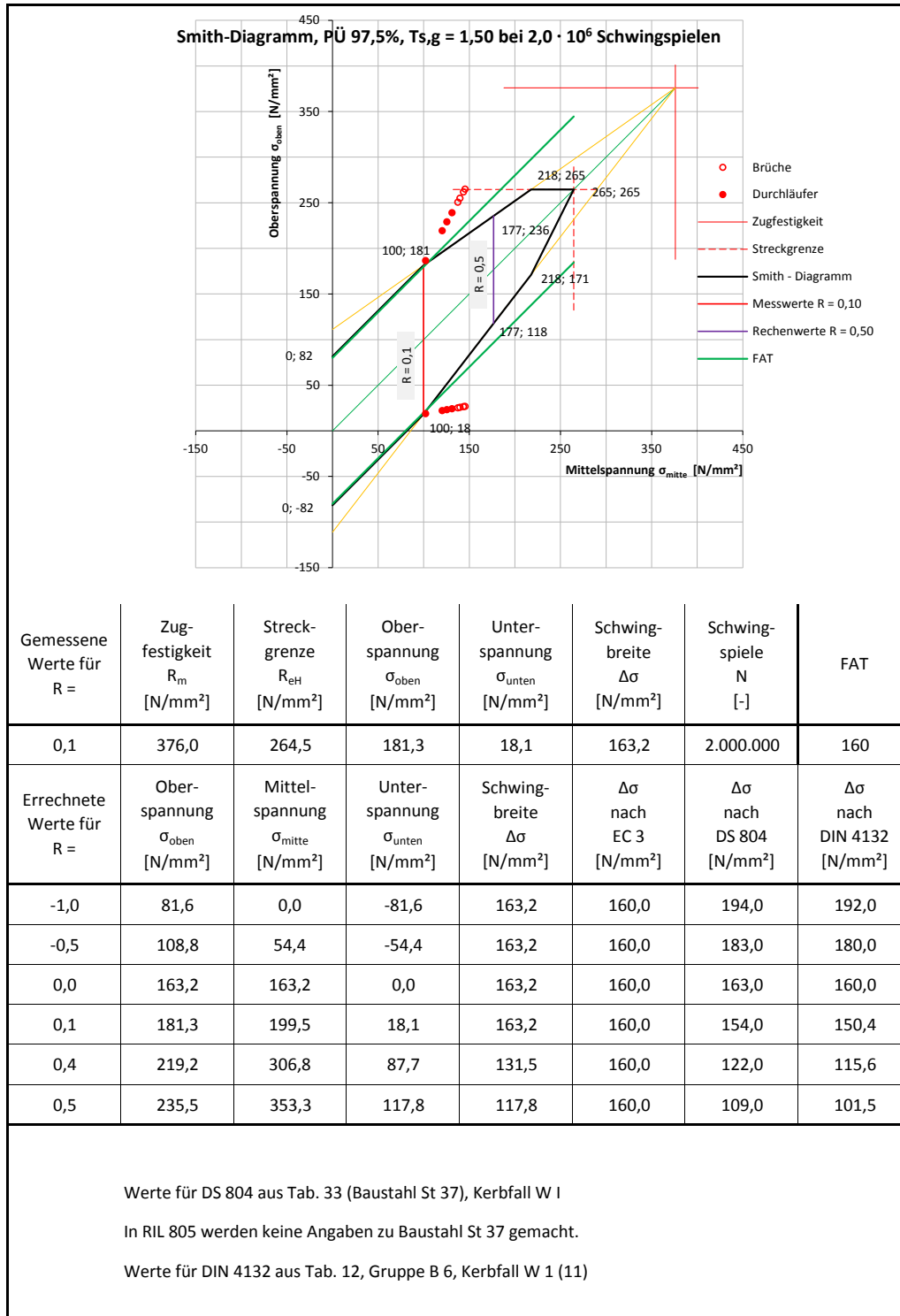


Probe Nr.:	G02-03
Herkunft:	HE-B 160 Verbandsstab / Gurt / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160





Probe Nr.:	G02-03
Herkunft:	HE-B 160 Verbandsstab / Gurt / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160



## **A.6 Probe G03-01**

Probe Nr.:	G03-01
Herkunft:	Kranträger / ungeschweißt / FAT 160

Chemie	Chemische Zusammensetzung [Massen-%]						
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,053	0,002	0,540	0,048	0,036	0,001	0,013
2	0,042	0,003	0,560	0,039	0,029	0,001	0,010
3	0,037	0,002	0,540	0,040	0,030	0,001	0,013
<b>Im Mittel</b>	<b>0,044</b>	<b>0,002</b>	<b>0,547</b>	<b>0,042</b>	<b>0,032</b>	<b>0,001</b>	<b>0,012</b>

Stahl	Thomasstahl (N), unberuhigt (Si, Al)
-------	--------------------------------------

Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]				
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>	
1	4	6	9	12	
2	4	5	11	18	
3	4	6	9	13	
<b>Im Mittel</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>14</b>	

Stahl	stark versprödeten Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden
-------	---

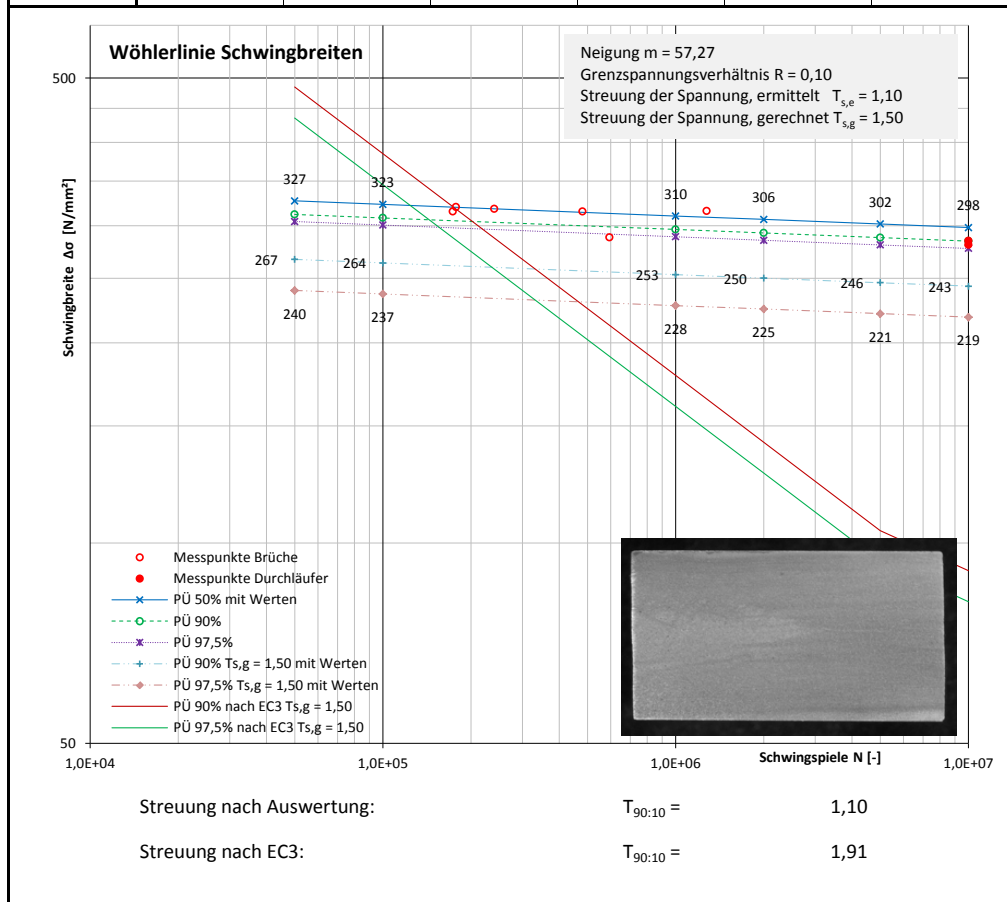
Mechanik	Mechanische Kennwerte				
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]	
1	361	472	55	25	
2	309	426	61	31	
3	337	433	58	29	
<b>Im Mittel</b>	<b>336</b>	<b>444</b>	<b>58</b>	<b>28</b>	

Stahl	S235 mit R <sub>eH</sub> > 235 N/mm² und R <sub>m</sub> > 360 N/mm²
-------	---

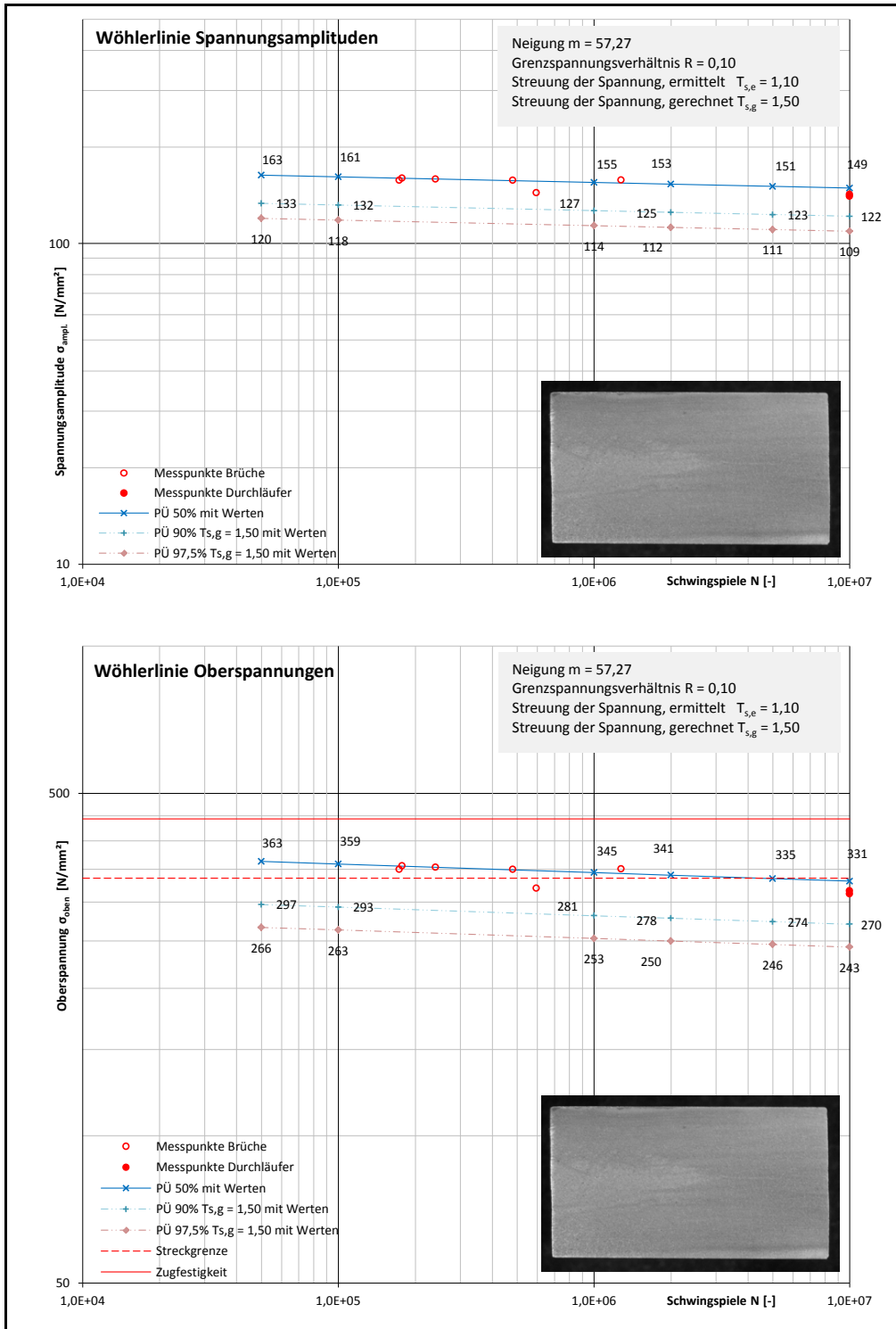
<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C  SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01	Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			Proben gegläht bei 1.000 °C
	Bez.	-20	0	20	
	1	12	21	30	
	2	18	15	23	
	3	13	11	37	
	<b>Im Mittel</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>30</b>	

Probe Nr.:	G03-01
Herkunft:	Kranträger / ungeschweißt / FAT 160

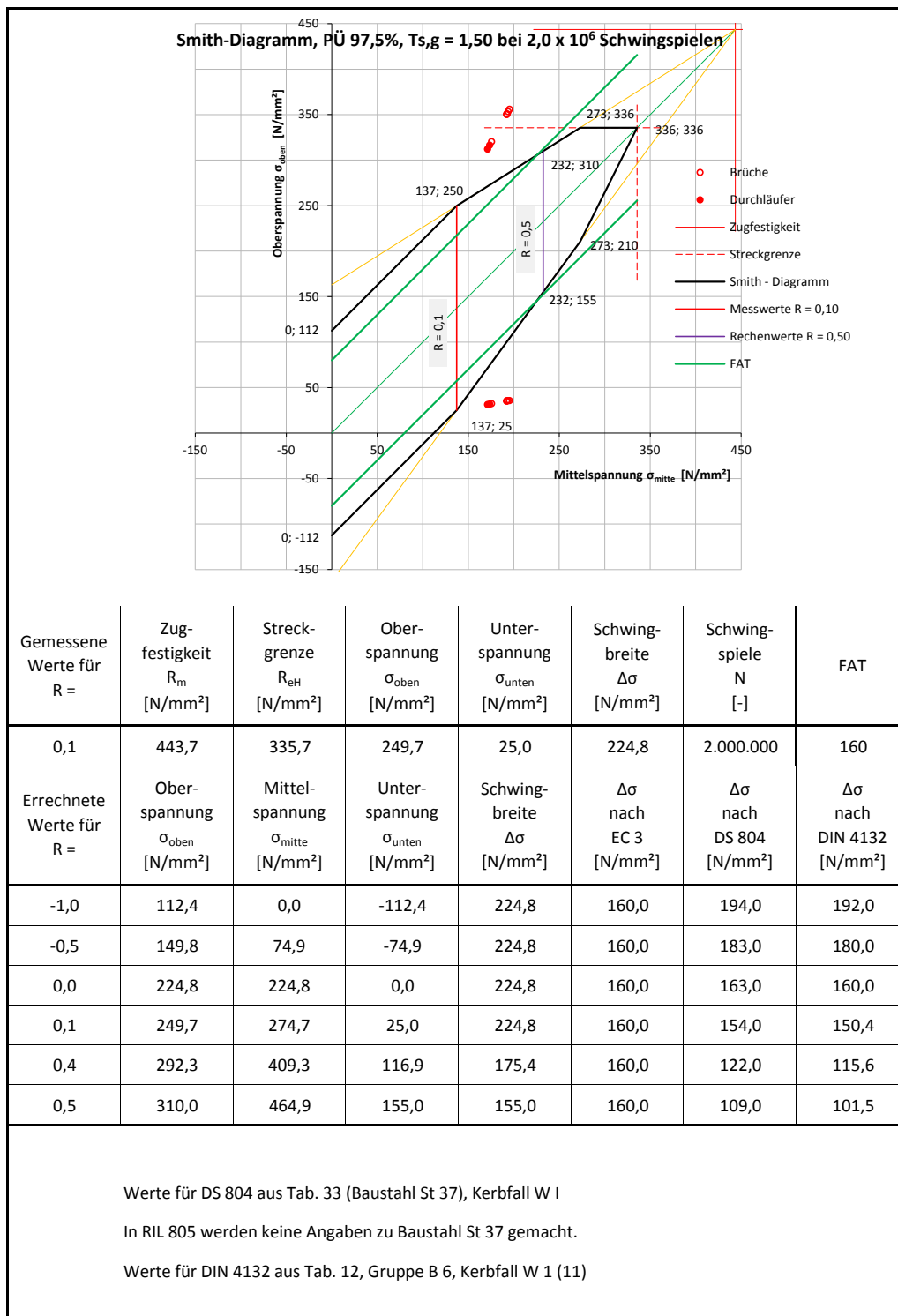
Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis $R =$		0,10	
	Grundmaterial, unbehandelt, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie $m =$		57,27	
			Abknickpunkt bei $N_B =$		1,00E+07	
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele $N$ [-]
1	320,0	176,0	32,0	144,0	288,0	594.760
2	349,9	192,4	35,0	157,5	314,9	173.397
3	349,9	192,4	35,0	157,5	314,9	481.314
4	316,2	173,9	31,6	142,3	284,6	10.000.000
5	355,5	195,5	35,6	160,0	320,0	177.676
6	311,8	171,5	31,2	140,3	280,6	10.000.000
7	353,1	194,2	35,3	158,9	317,8	240.395
8	350,7	192,9	35,1	157,8	315,6	1.276.660



Probe Nr.:	G03-01
Herkunft:	Kranträger / ungeschweißt / FAT 160

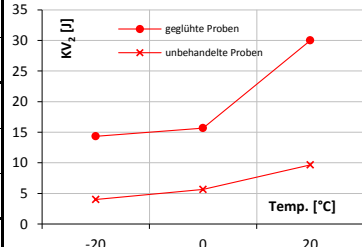
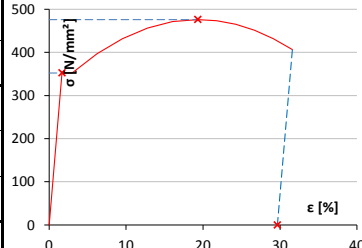


Probe Nr.:	G03-01
Herkunft:	Kranträger / ungeschweißt / FAT 160



## **A.7 Probe G03-02**

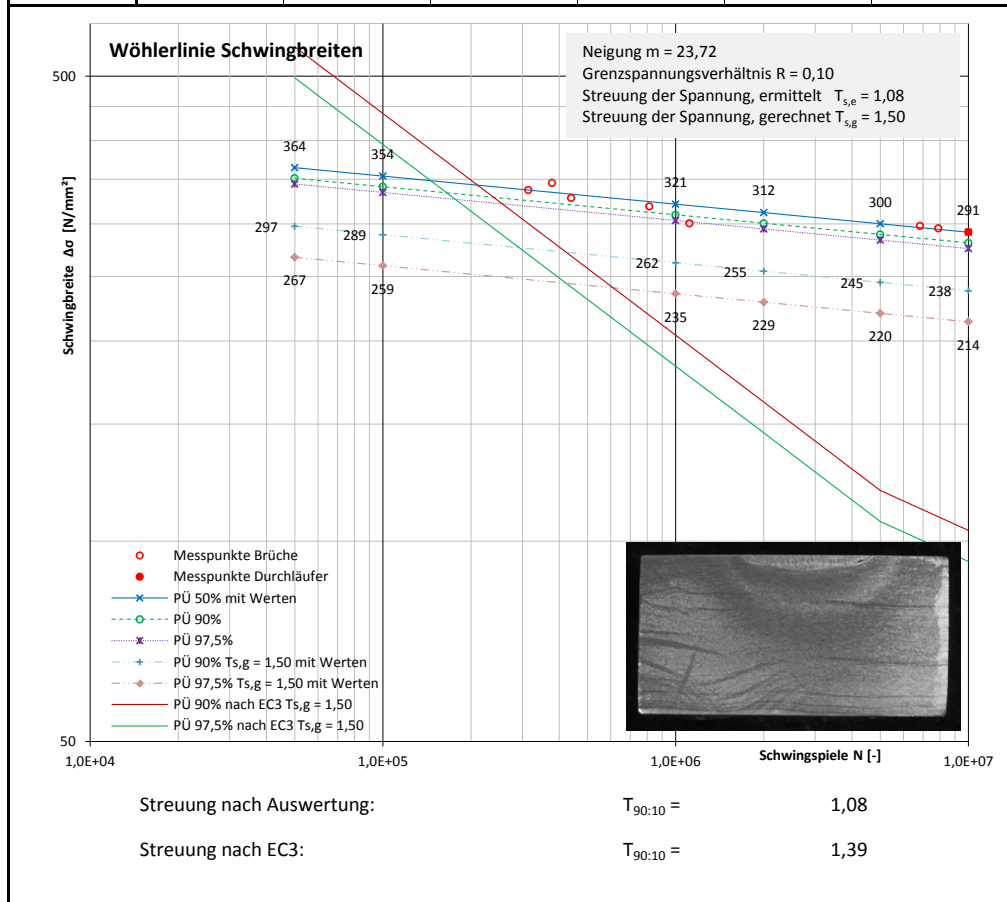
Probe Nr.:	G03-02
Herkunft:	Kranträger / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160

Chemie		Chemische Zusammensetzung [Massen-%]					
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,053	0,002	0,540	0,048	0,036	0,001	0,013
2	0,042	0,003	0,560	0,039	0,029	0,001	0,010
3	0,037	0,002	0,540	0,040	0,030	0,001	0,013
Im Mittel	0,044	0,002	0,547	0,042	0,032	0,001	0,012
Stahl	Thomasstahl (N), unberuhigt (Si, Al)						
Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]						
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>			
1	4	6	9	12			
2	4	5	11	18			
3	4	6	9	13			
Im Mittel	4	6	10	14			
Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden						
Mechanik	Mechanische Kennwerte						
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]			
1	324	477	49	30			
2	374	506	48	30			
3	359	445	51	29			
Im Mittel	352	476	49	30			
Stahl	annähernd S355 mit R <sub>eH</sub> ≈ 355 N/mm² und R <sub>m</sub> ≈ 490 N/mm² - die Werte haben sich verbessert!						
<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C		Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			Proben gegläht bei 1.000 °C	
		Bez.	-20	0	20		
		1	12	21	30		
		2	18	15	23		
		3	13	11	37		
		Im Mittel	14	16	30		
		SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01					

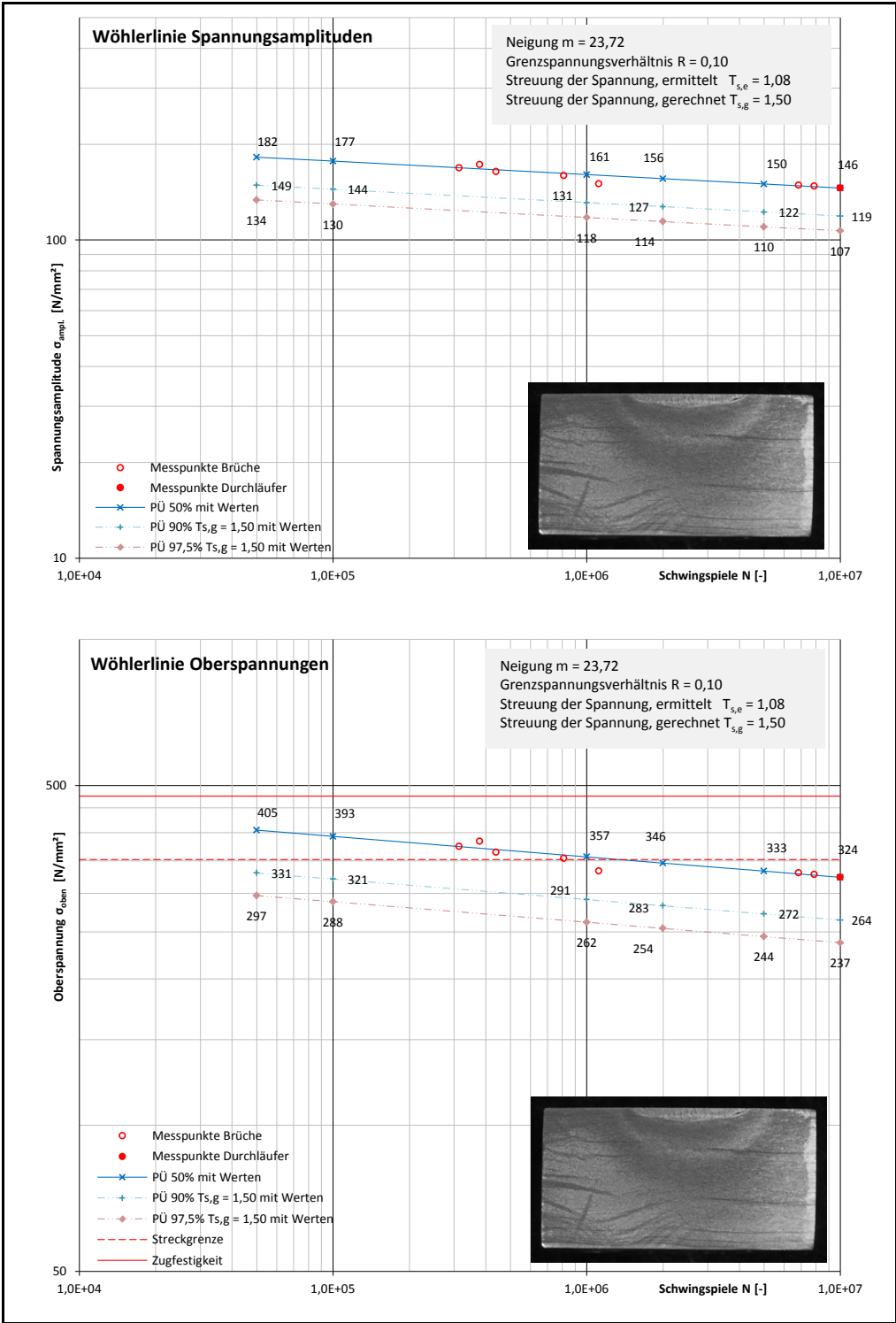


Probe Nr.:	G03-02
Herkunft:	Kranträger / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160

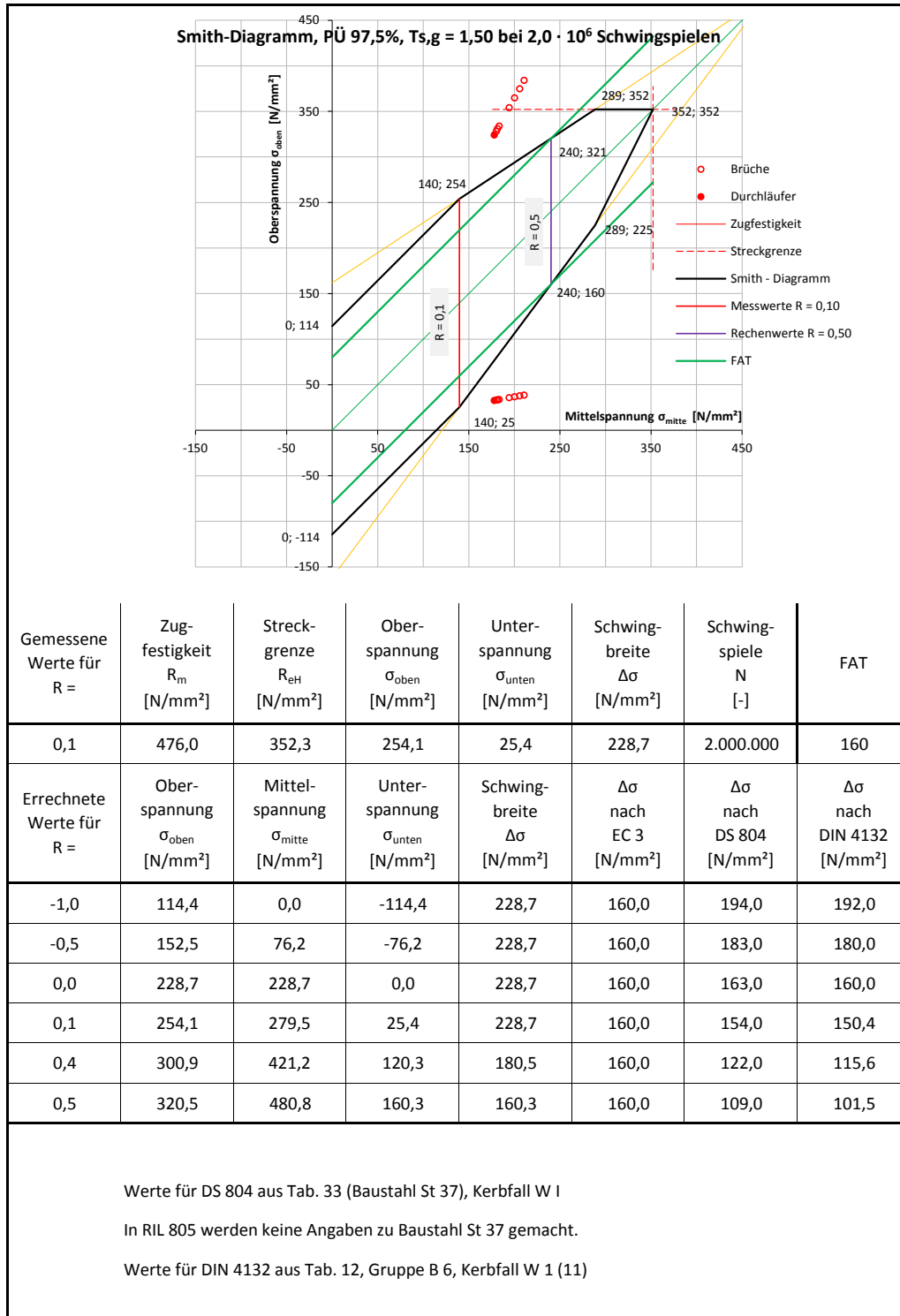
Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspanungsverhältnis $R =$		0,10	
	Grundmaterial, Auftragsraupe, Abschleiß, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie $m =$		23,72	
			Abknickpunkt bei $N_B =$		1,00E+07	
Bez.	Ober-spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel-spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter-spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs-amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele $N$ [-]
1	328,0	180,4	32,8	147,6	295,2	7.904.496
2	330,7	181,9	33,1	148,8	297,6	6.846.067
3	374,6	206,0	37,5	168,6	337,1	314.386
4	323,8	178,1	32,4	145,7	291,4	10.000.000
5	383,7	211,0	38,4	172,7	345,3	378.657
6	364,5	200,5	36,5	164,0	328,1	439.985
7	353,9	194,6	35,4	159,3	318,5	812.931
8	333,6	183,5	33,4	150,1	300,2	1.116.825



Probe Nr.:	G03-02
Herkunft:	Kranträger / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160

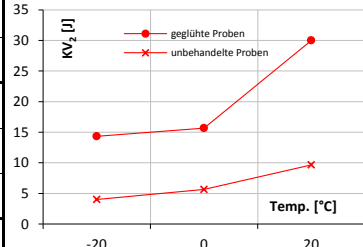
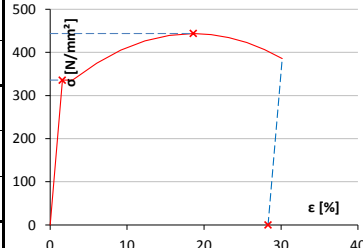


Probe Nr.:	G03-02
Herkunft:	Kranträger / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160



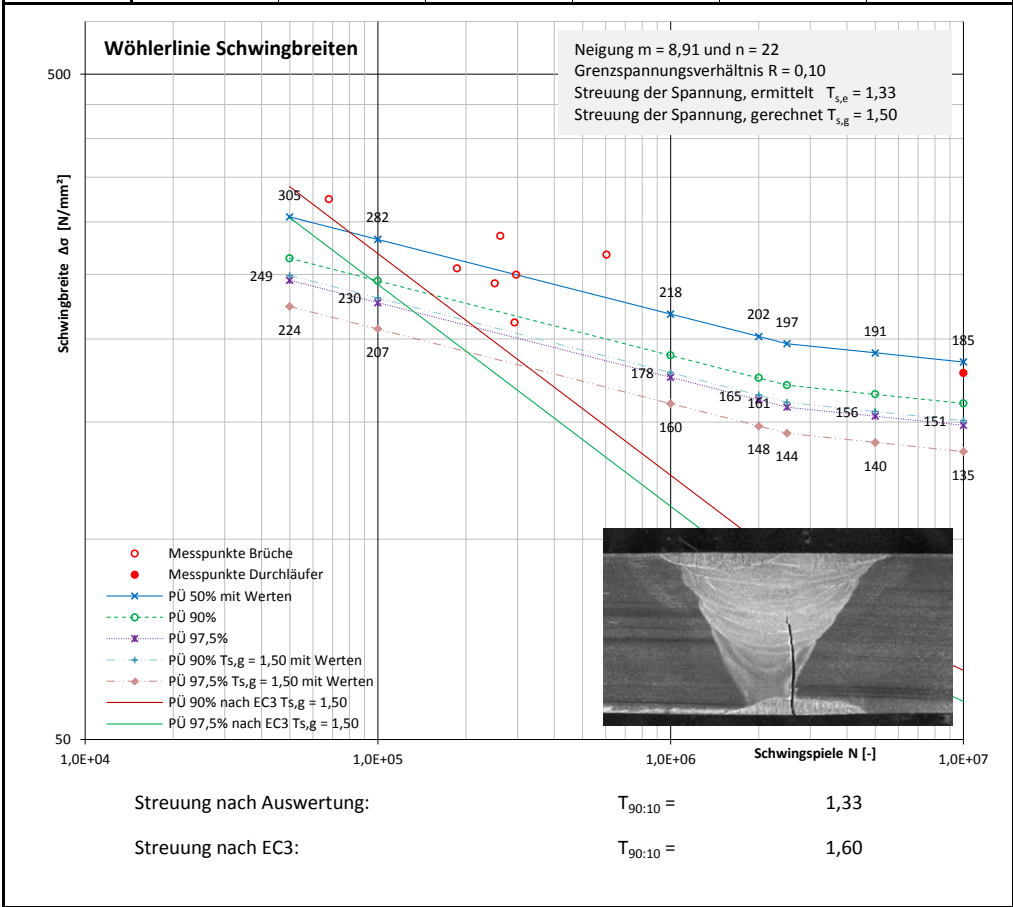
## **A.8 Probe G03-03**

Probe Nr.:	G03-03
Herkunft:	Kranträger / Vollnaht eingeebnet / FAT 112

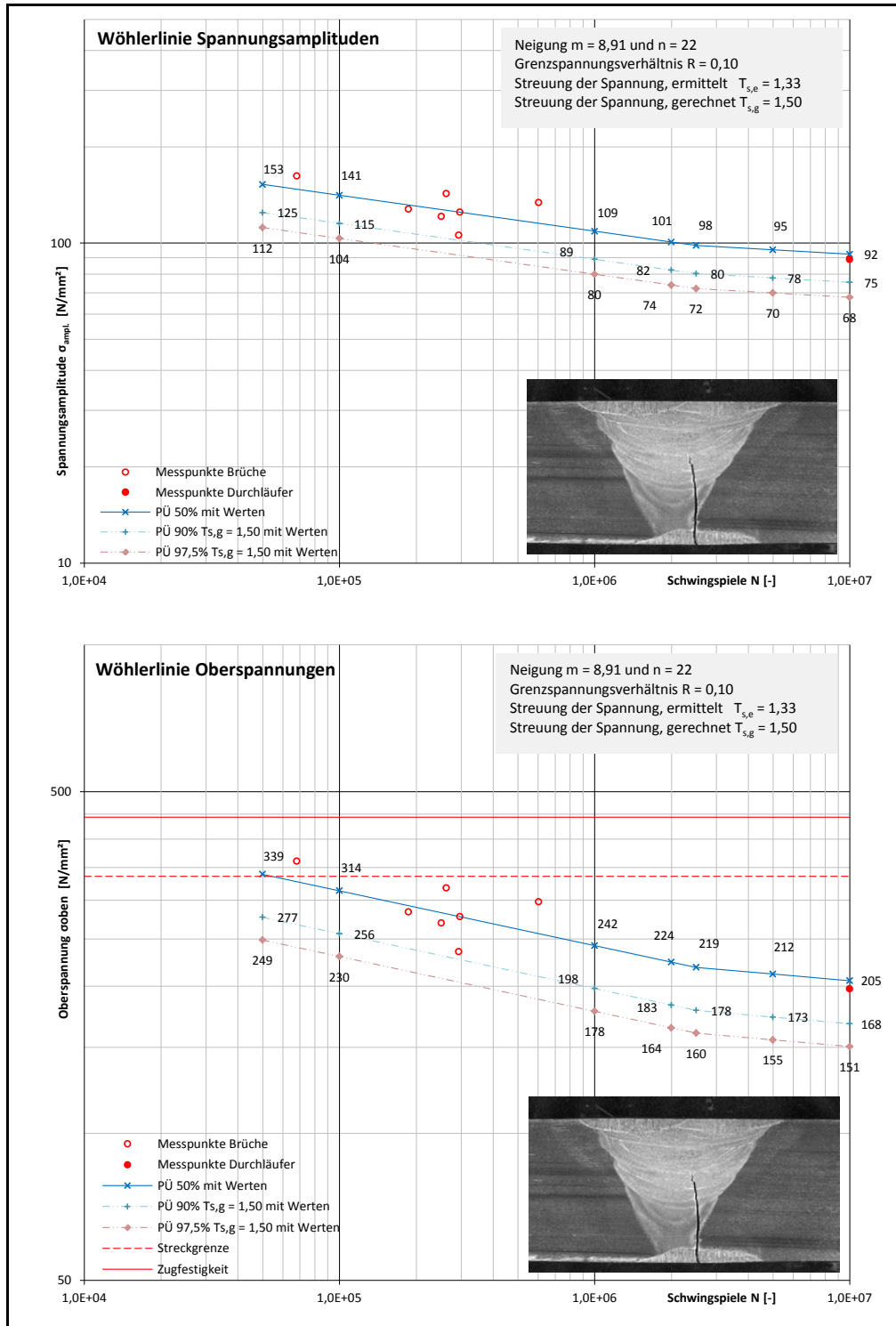
Chemie		Chemische Zusammensetzung [Massen-%]					
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,053	0,002	0,540	0,048	0,036	0,001	0,013
2	0,042	0,003	0,560	0,039	0,029	0,001	0,010
3	0,037	0,002	0,540	0,040	0,030	0,001	0,013
Im Mittel	0,044	0,002	0,547	0,042	0,032	0,001	0,012
Stahl	Thomasstahl (N), unberuhigt (Si, Al)						
Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]						
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>			
1	4	6	9	12			
2	4	5	11	18			
3	4	6	9	13			
Im Mittel	4	6	10	14			
Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden						
Mechanik	Mechanische Kennwerte						
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]			
1	361	472	55	25			
2	309	426	61	31			
3	337	433	58	29			
Im Mittel	336	444	58	28			
Stahl	S235 mit R <sub>eH</sub> > 235 N/mm² und R <sub>m</sub> > 360 N/mm²						
<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C		Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			Proben gegläht bei 1.000 °C	
		Bez.	-20	0	20		
		1	12	21	30		
		2	18	15	23		
		3	13	11	37		
		Im Mittel	14	16	30		
		SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01					

Probe Nr.:	G03-03
Herkunft:	Kranträger / Vollnaht eingeebnet / FAT 112

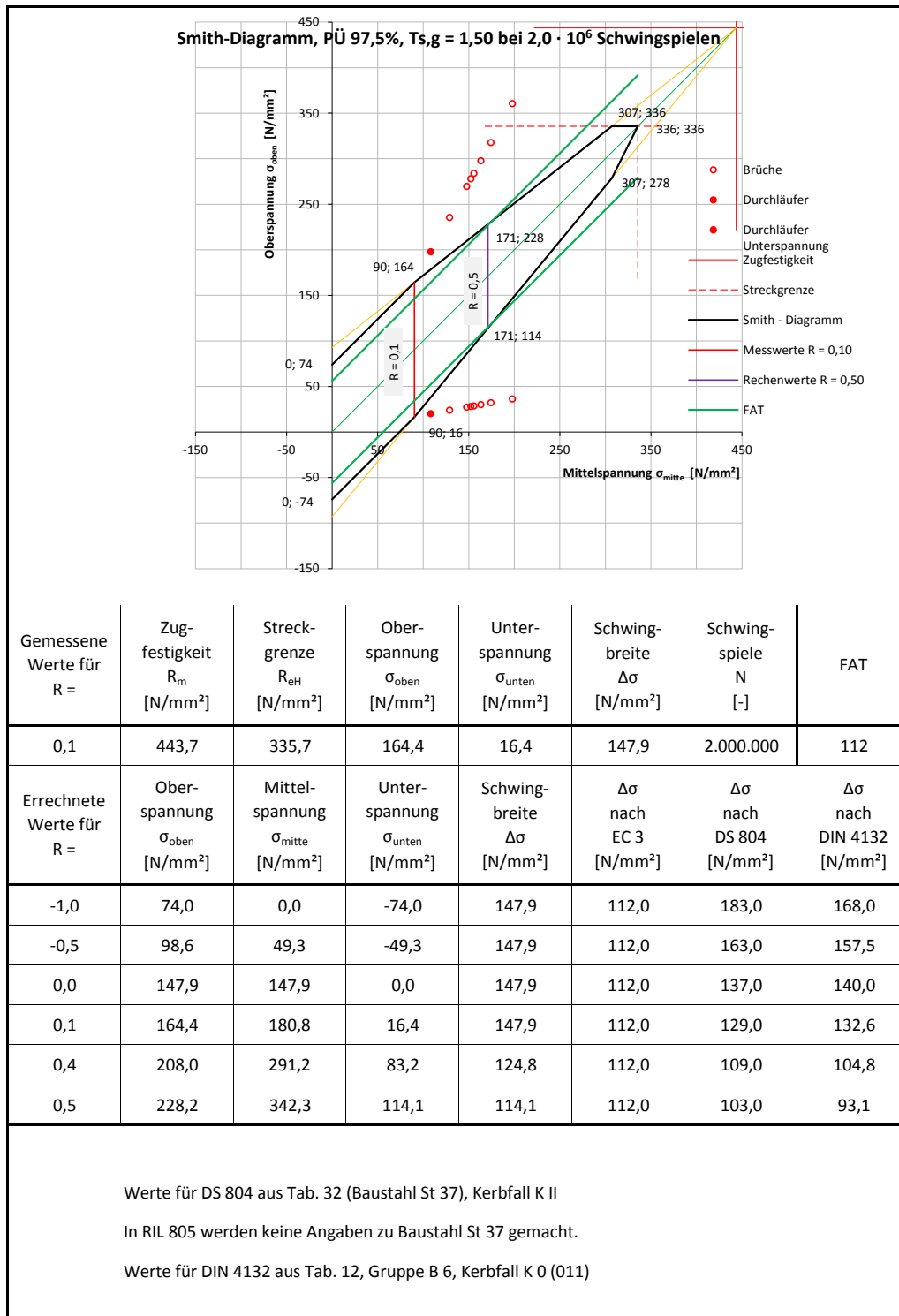
Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis		R =	0,10
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 112		Neigung der Wöhlerlinie		m =	8,91
			Abknickpunkt bei		N <sub>B</sub> =	2,50E+06
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	317,5	174,6	31,8	142,9	285,8	262.284
2	297,4	163,6	29,7	133,8	267,7	604.050
3	360,3	198,2	36,0	162,1	324,3	68.141
4	283,7	156,0	28,4	127,7	255,3	186.569
5	269,2	148,1	26,9	121,1	242,3	250.924
6	235,2	129,4	23,5	105,8	211,7	293.625
7	277,6	152,7	27,8	124,9	249,8	296.895
8	197,5	108,6	19,8	88,9	177,8	10.000.000



Probe Nr.:	G03-03
Herkunft:	Kranträger / Vollnaht eingeebnet / FAT 112



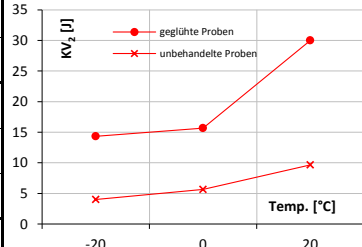
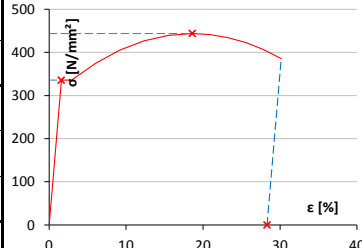
Probe Nr.:	G03-03
Herkunft:	Kranträger / Vollnaht eingeebnet / FAT 112





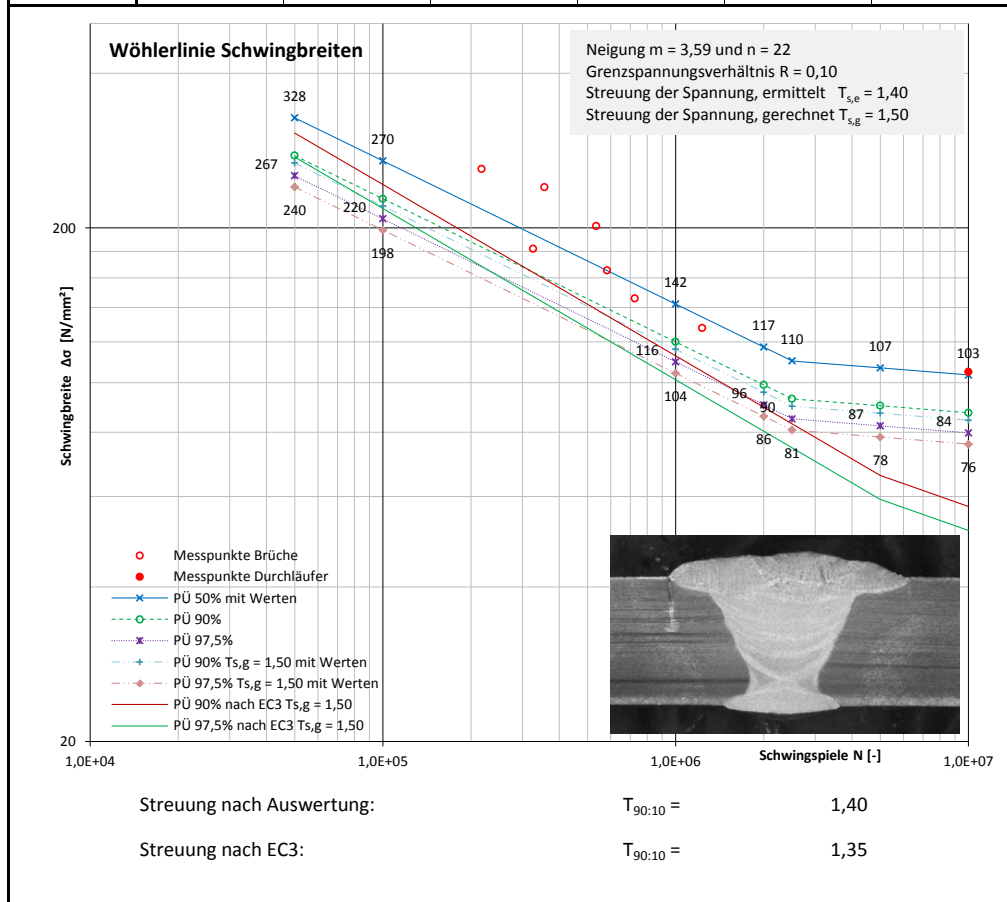
## A.9 Probe G03-04

Probe Nr.:	G03-04
Herkunft:	Kranträger / Vollnaht / FAT 90

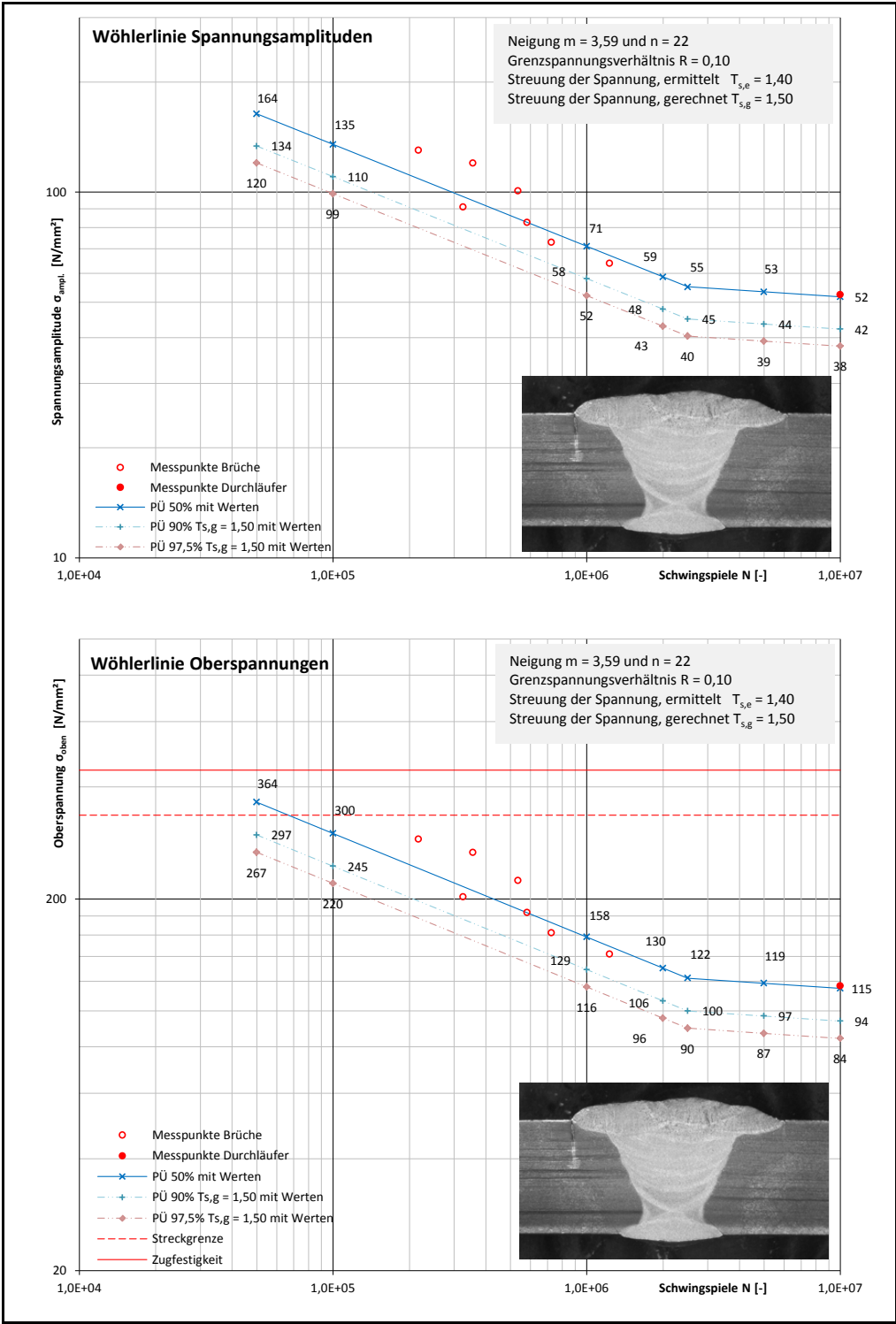
Chemie		Chemische Zusammensetzung [Massen-%]																														
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N																									
1	0,053	0,002	0,540	0,048	0,036	0,001	0,013																									
2	0,042	0,003	0,560	0,039	0,029	0,001	0,010																									
3	0,037	0,002	0,540	0,040	0,030	0,001	0,013																									
Im Mittel	0,044	0,002	0,547	0,042	0,032	0,001	0,012																									
Stahl	Thomasstahl (N), unberuhigt (Si, Al)																															
Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]																															
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>																												
1	4	6	9	12																												
2	4	5	11	18																												
3	4	6	9	13																												
Im Mittel	4	6	10	14																												
Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden																															
Mechanik	Mechanische Kennwerte																															
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]																												
1	361	472	55	25																												
2	309	426	61	31																												
3	337	433	58	29																												
Im Mittel	336	444	58	28																												
Stahl	S235 mit R <sub>eH</sub> > 235 N/mm² und R <sub>m</sub> > 360 N/mm²																															
<div><div><sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C</div><div><table><tr><th>Zähigkeit</th><th colspan="3">KV<sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]</th><th rowspan="7">Proben gegläht bei 1.000 °C</th></tr><tr><th>Bez.</th><th>-20</th><th>0</th><th>20</th></tr><tr><td>1</td><td>12</td><td>21</td><td>30</td></tr><tr><td>2</td><td>18</td><td>15</td><td>23</td></tr><tr><td>3</td><td>13</td><td>11</td><td>37</td></tr><tr><td>Im Mittel</td><td>14</td><td>16</td><td>30</td></tr></table></div></div>								Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			Proben gegläht bei 1.000 °C	Bez.	-20	0	20	1	12	21	30	2	18	15	23	3	13	11	37	Im Mittel	14	16	30
								Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]				Proben gegläht bei 1.000 °C																			
								Bez.	-20	0	20																					
								1	12	21	30																					
								2	18	15	23																					
								3	13	11	37																					
								Im Mittel	14	16	30																					
SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01																																

Probe Nr.:	G03-04
Herkunft:	Kranträger / Vollnaht / FAT 90

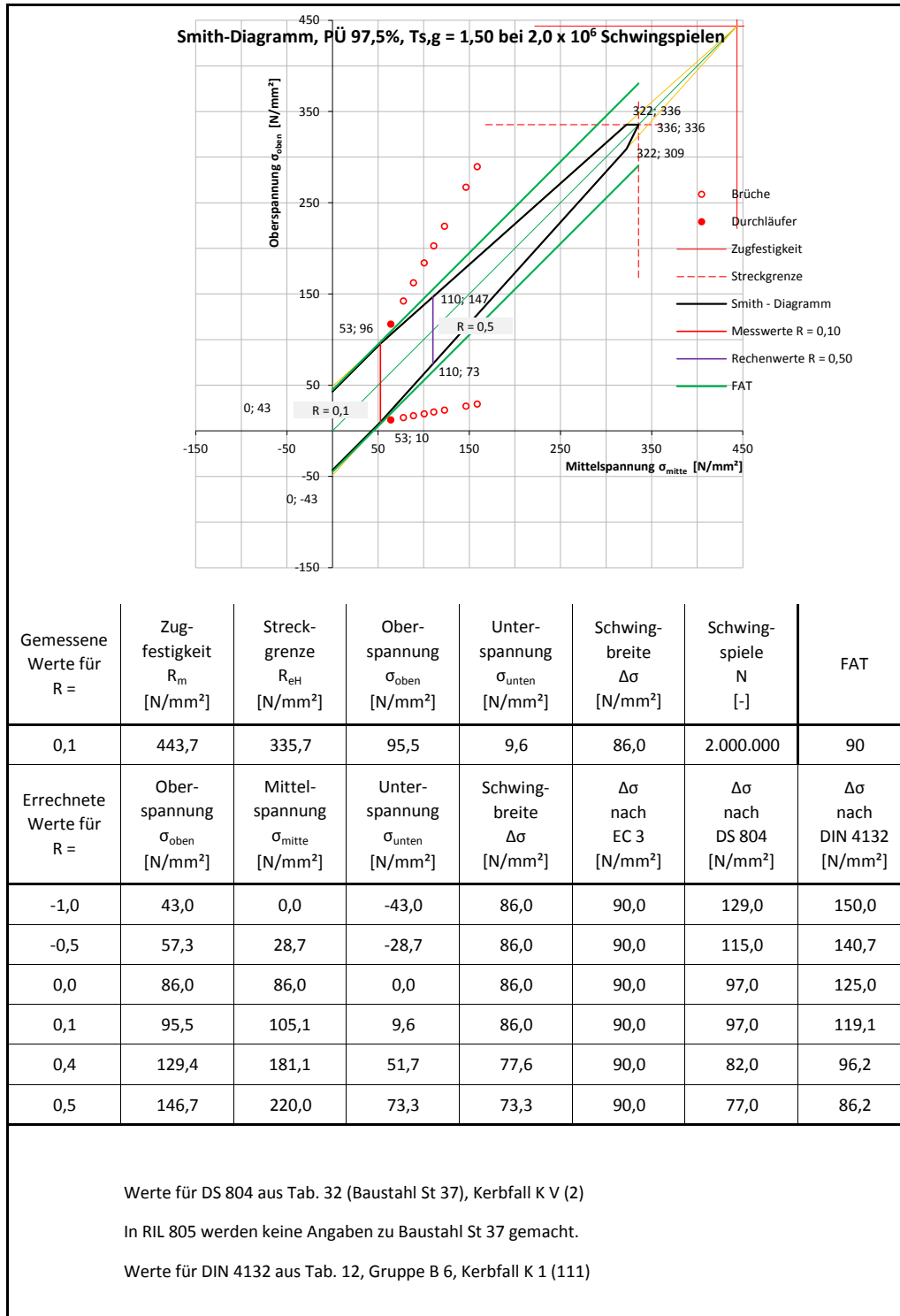
Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis $R =$		0,10	
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 90		Neigung der Wöhlerlinie $m =$		3,59	
			Abknickpunkt bei $N_B =$		2,50E+06	
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	266,6	146,6	26,7	120,0	239,9	356.527
2	202,4	111,3	20,2	91,1	182,2	326.193
3	161,9	89,0	16,2	72,9	145,7	726.306
4	116,6	64,1	11,7	52,5	104,9	10.000.000
5	141,9	78,0	14,2	63,9	127,7	1.232.344
6	224,0	123,2	22,4	100,8	201,6	536.167
7	289,2	159,1	28,9	130,1	260,3	217.575
8	183,6	101,0	18,4	82,6	165,2	583.293



Probe Nr.:	G03-04
Herkunft:	Kranträger / Vollnaht / FAT 90



Probe Nr.:	G03-04
Herkunft:	Kranträger / Vollnaht / FAT 90



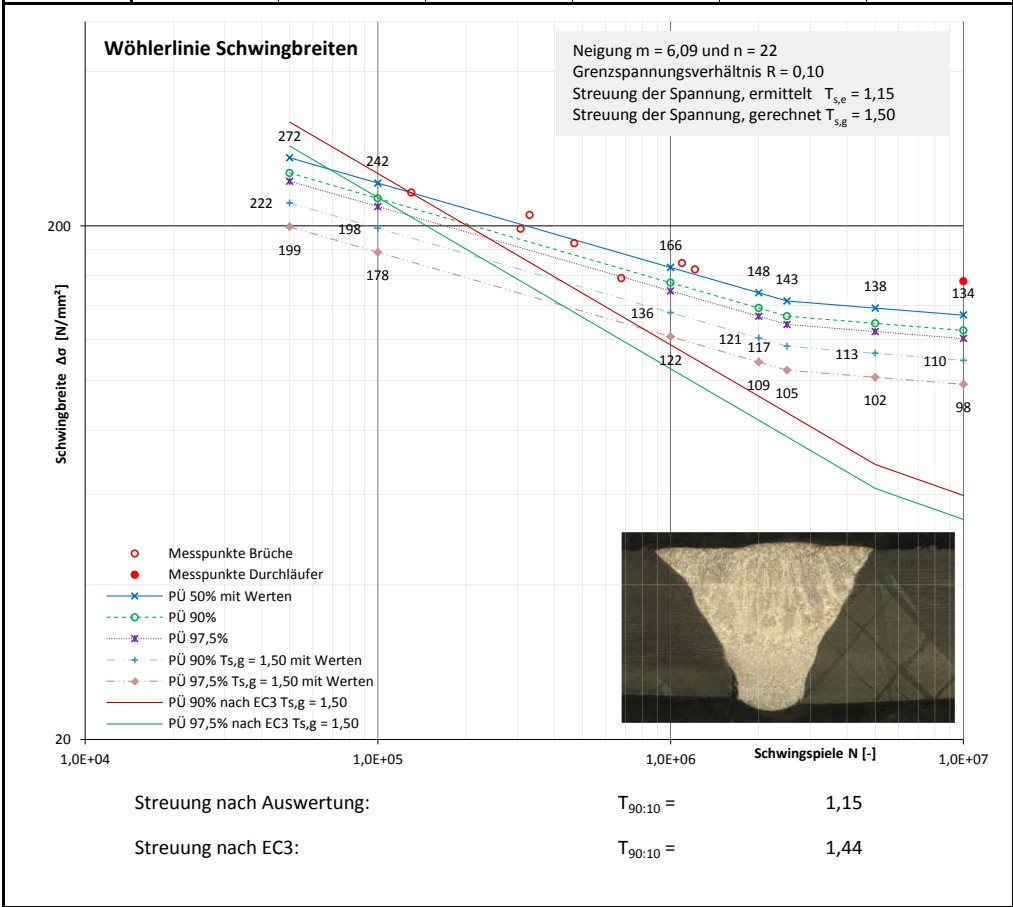
## **A.10 Probe G03-05**

Probe Nr.:	G03-05
Herkunft:	Kranträger / Vollnaht / FAT 71

Chemie		Chemische Zusammensetzung [Massen-%]						
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N	
1	0,053	0,002	0,540	0,048	0,036	0,001	0,013	
2	0,042	0,003	0,560	0,039	0,029	0,001	0,010	
3	0,037	0,002	0,540	0,040	0,030	0,001	0,013	
Im Mittel	0,044	0,002	0,547	0,042	0,032	0,001	0,012	
Stahl	Thomasstahl (N), unberuhigt (Si, Al)							
Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]							
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>				
1	4	6	9	12				
2	4	5	11	18				
3	4	6	9	13				
Im Mittel	4	6	10	14				
Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden							
Mechanik	Mechanische Kennwerte							
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]				
1	361	472	55	25				
2	309	426	61	31				
3	337	433	58	29				
Im Mittel	336	444	58	28				
Stahl	S235 mit R <sub>eH</sub> > 235 N/mm² und R <sub>m</sub> > 360 N/mm²							
<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C				Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			Proben gegläht bei 1.000 °C
				Bez.	-20	0	20	
				1	12	21	30	
				2	18	15	23	
				3	13	11	37	
				Im Mittel	14	16	30	
				SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01				

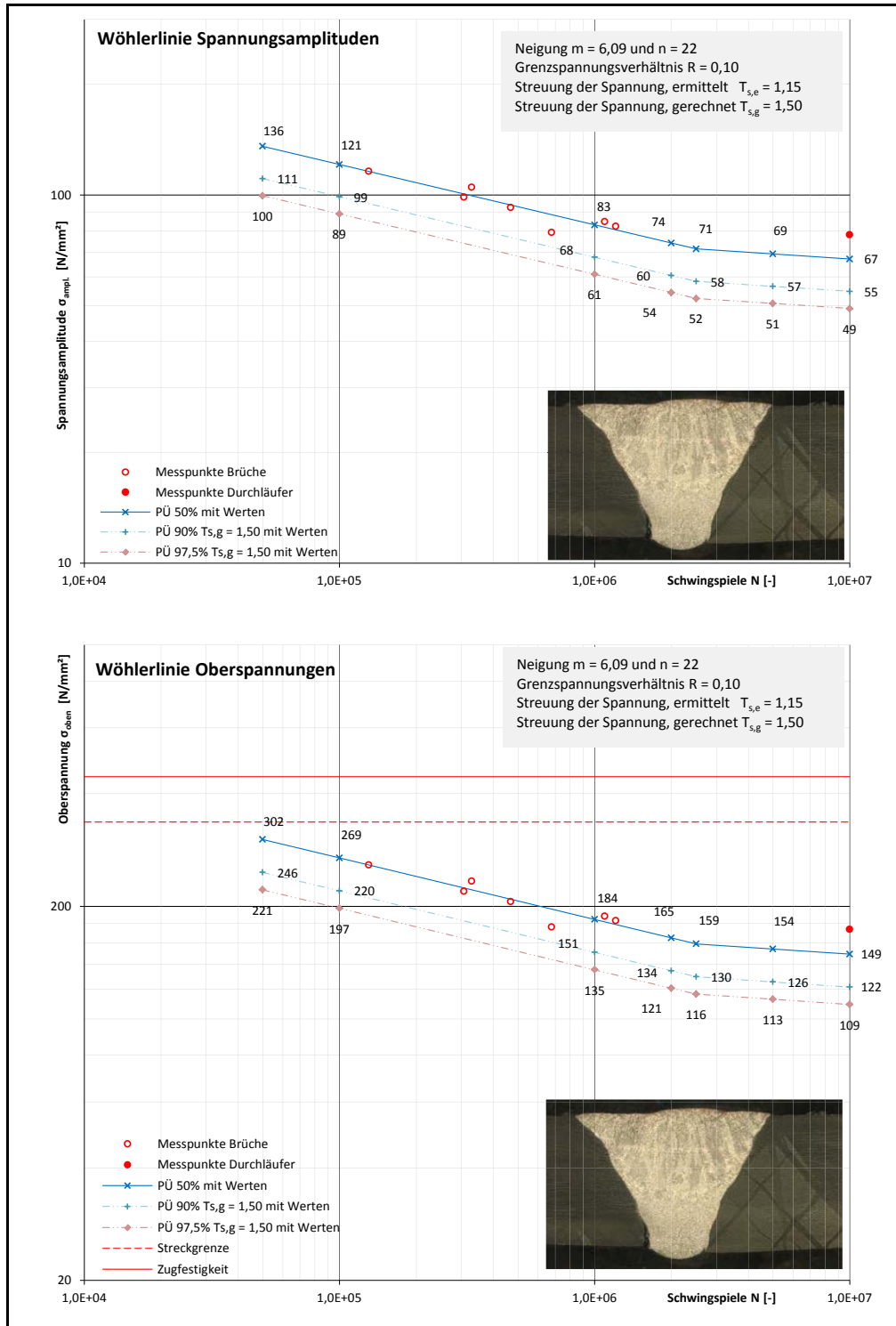
Probe Nr.:	G03-05
Herkunft:	Kranträger / Vollnaht / FAT 71

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis		R =	0,10
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 71		Neigung der Wöhlerlinie		m =	6,09
			Abknickpunkt bei		N <sub>B</sub> =	2,50E+06
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{\text{oben}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{\text{mitte}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{\text{unten}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{\text{ampl.}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	175,8	96,7	17,6	79,1	158,2	679.545
2	257,8	141,8	25,8	116,0	232,0	130.311
3	205,5	113,0	20,6	92,5	185,0	469.242
4	233,2	128,3	23,3	104,9	209,9	330.230
5	219,3	120,6	21,9	98,7	197,4	307.789
6	182,8	100,5	18,3	82,3	164,5	1.211.695
7	188,1	103,5	18,8	84,6	169,3	1.095.918
8	173,3	95,3	17,3	78,0	156,0	10.000.000

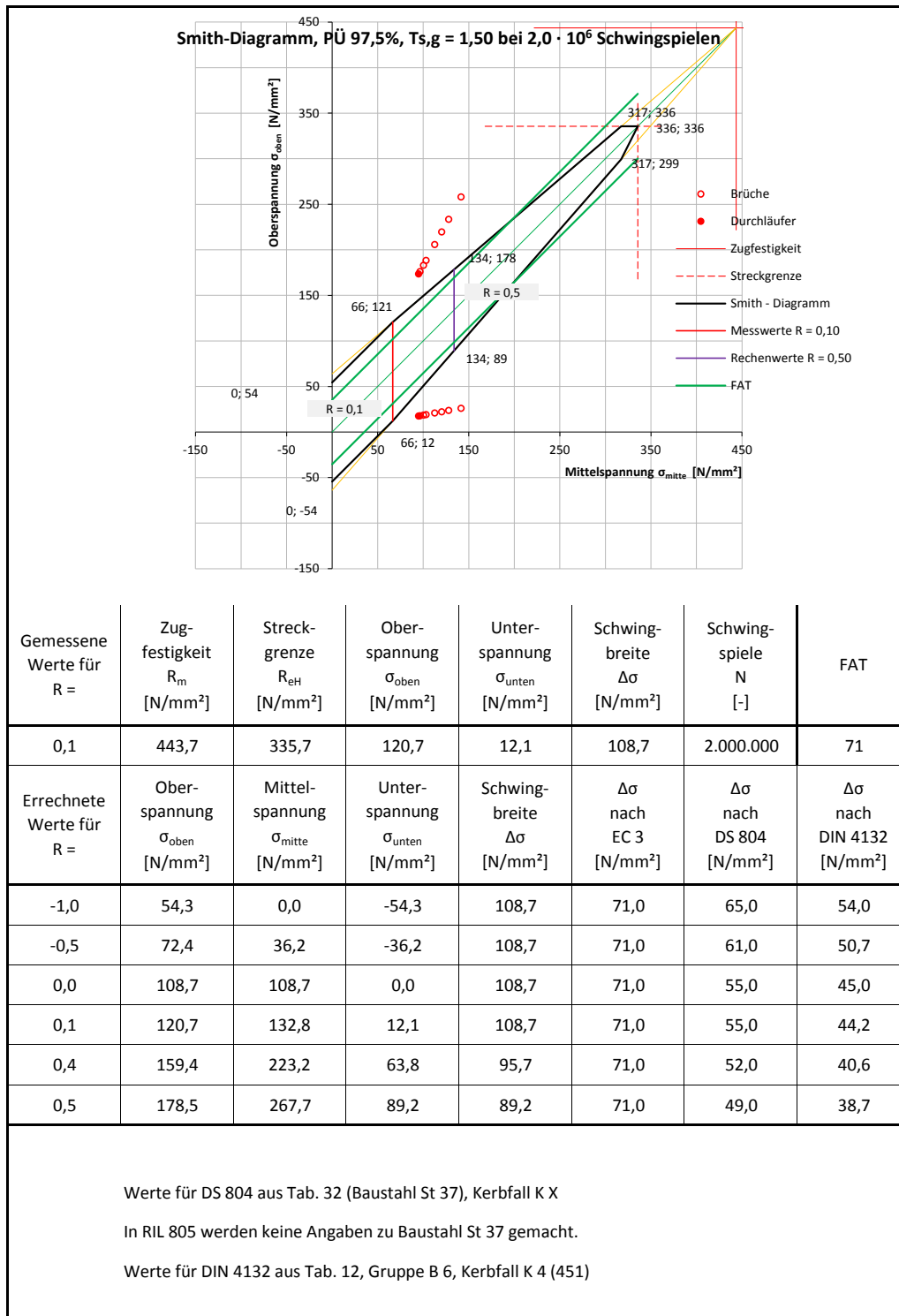




Probe Nr.:	G03-05
Herkunft:	Kranträger / Vollnaht / FAT 71



Probe Nr.:	G03-05
Herkunft:	Kranträger / Vollnaht / FAT 71



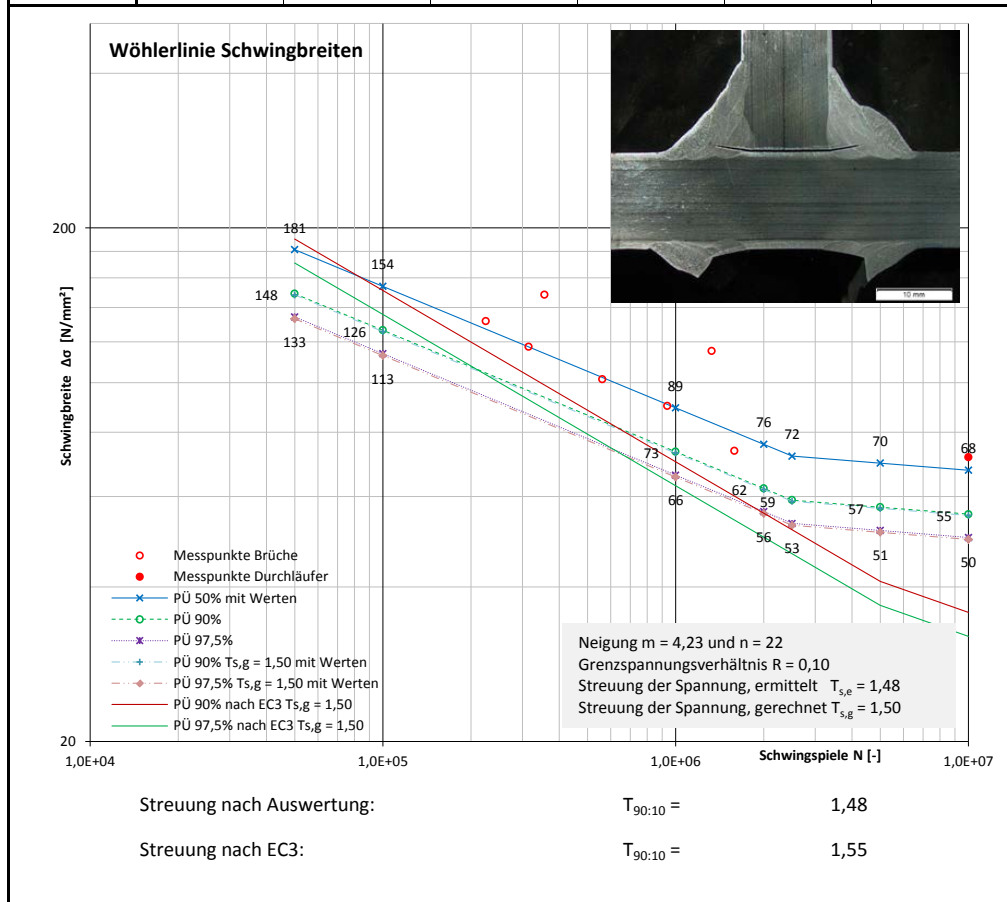
## **A.11 Probe G03-06**

Probe Nr.:	G03-06
Herkunft:	Kranträger / Kehlnähte als Kreuzstoss / FAT 36

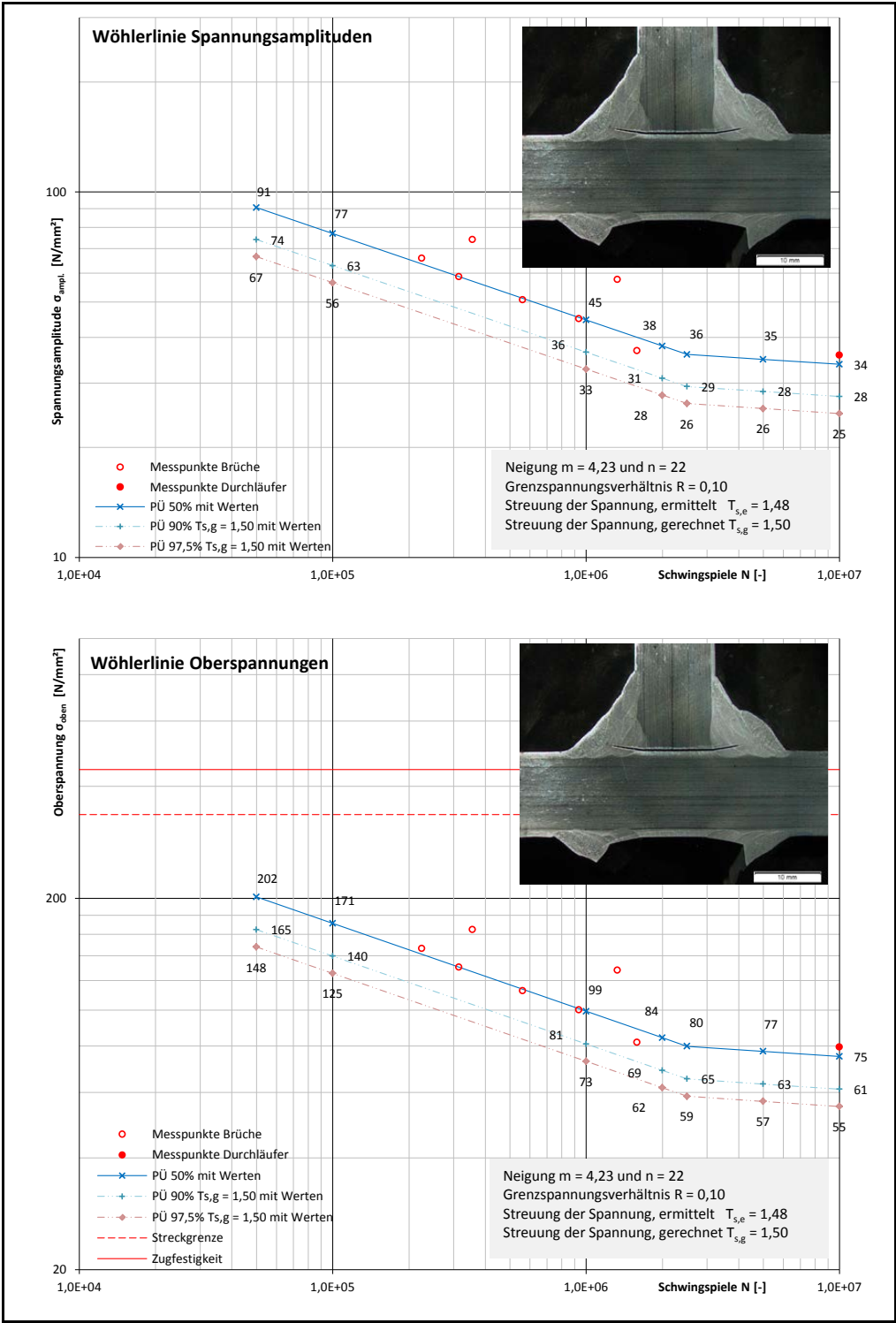
Chemie		Chemische Zusammensetzung [Massen-%]						
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N	
1	0,053	0,002	0,540	0,048	0,036	0,001	0,013	
2	0,042	0,003	0,560	0,039	0,029	0,001	0,010	
3	0,037	0,002	0,540	0,040	0,030	0,001	0,013	
Im Mittel	0,044	0,002	0,547	0,042	0,032	0,001	0,012	
Stahl	Thomasstahl (N), unberuhigt (Si, Al)							
Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]							
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>				
1	4	6	9	12				
2	4	5	11	18				
3	4	6	9	13				
Im Mittel	4	6	10	14				
Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden							
Mechanik	Mechanische Kennwerte							
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]				
1	361	472	55	25				
2	309	426	61	31				
3	337	433	58	29				
Im Mittel	336	444	58	28				
Stahl	S235 mit R <sub>eH</sub> > 235 N/mm² und R <sub>m</sub> > 360 N/mm²							
<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C				Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			Proben gegläht bei 1.000 °C
				Bez.	-20	0	20	
				1	12	21	30	
				2	18	15	23	
				3	13	11	37	
				Im Mittel	14	16	30	
				SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01				

Probe Nr.:	G03-06
Herkunft:	Kranträger / Kehlnähte als Kreuzstoss / FAT 36

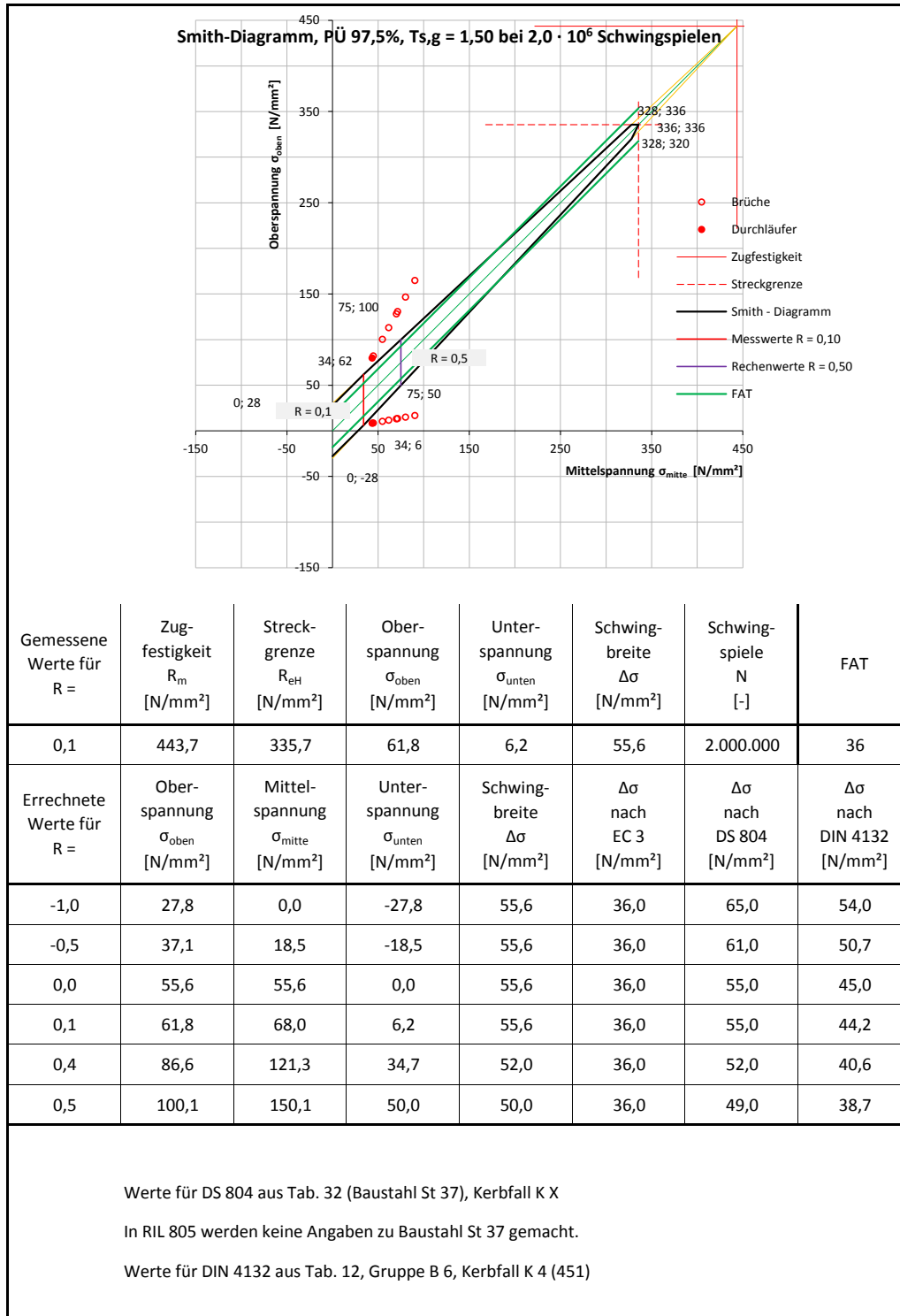
Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis $R =$		0,10	
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Kehlnaht-Kreuzstoss, FAT 36		Neigung der Wöhlerlinie $m =$		4,23	
			Abknickpunkt bei $N_B =$		2,50E+06	
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	100,0	55,0	10,0	45,0	90,0	936.537
2	130,4	71,7	13,0	58,7	117,4	315.121
3	146,3	80,5	14,6	65,8	131,7	224.908
4	128,0	70,4	12,8	57,6	115,2	1.328.538
5	79,5	43,7	8,0	35,8	71,6	10.000.000
6	112,7	62,0	11,3	50,7	101,4	562.096
7	81,8	45,0	8,2	36,8	73,6	1.588.272
8	164,6	90,5	16,5	74,1	148,1	356.520



Probe Nr.:	G03-06
Herkunft:	Kranträger / Kehlnähte als Kreuzstoss / FAT 36



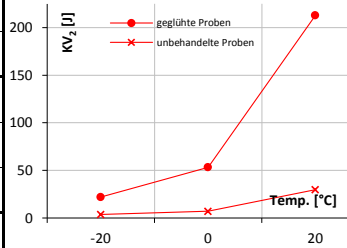
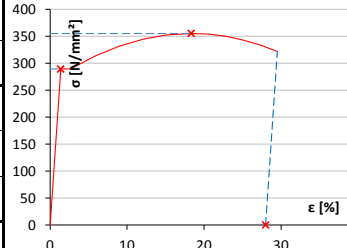
Probe Nr.:	G03-06
Herkunft:	Kranträger / Kehlnähte als Kreuzstoss / FAT 36



## **A.12 Probe G04-01**

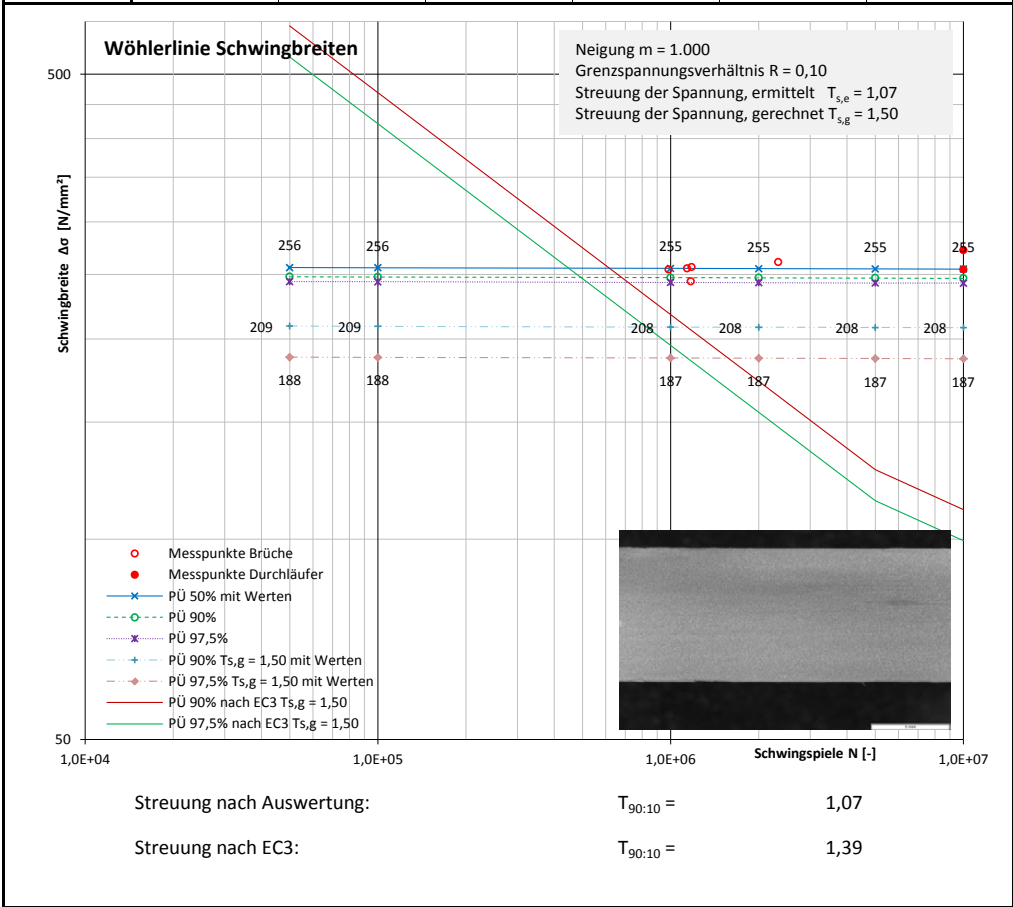


Probe Nr.:	G04-01
Herkunft:	Winkelstütze / ungeschweißt / FAT 160

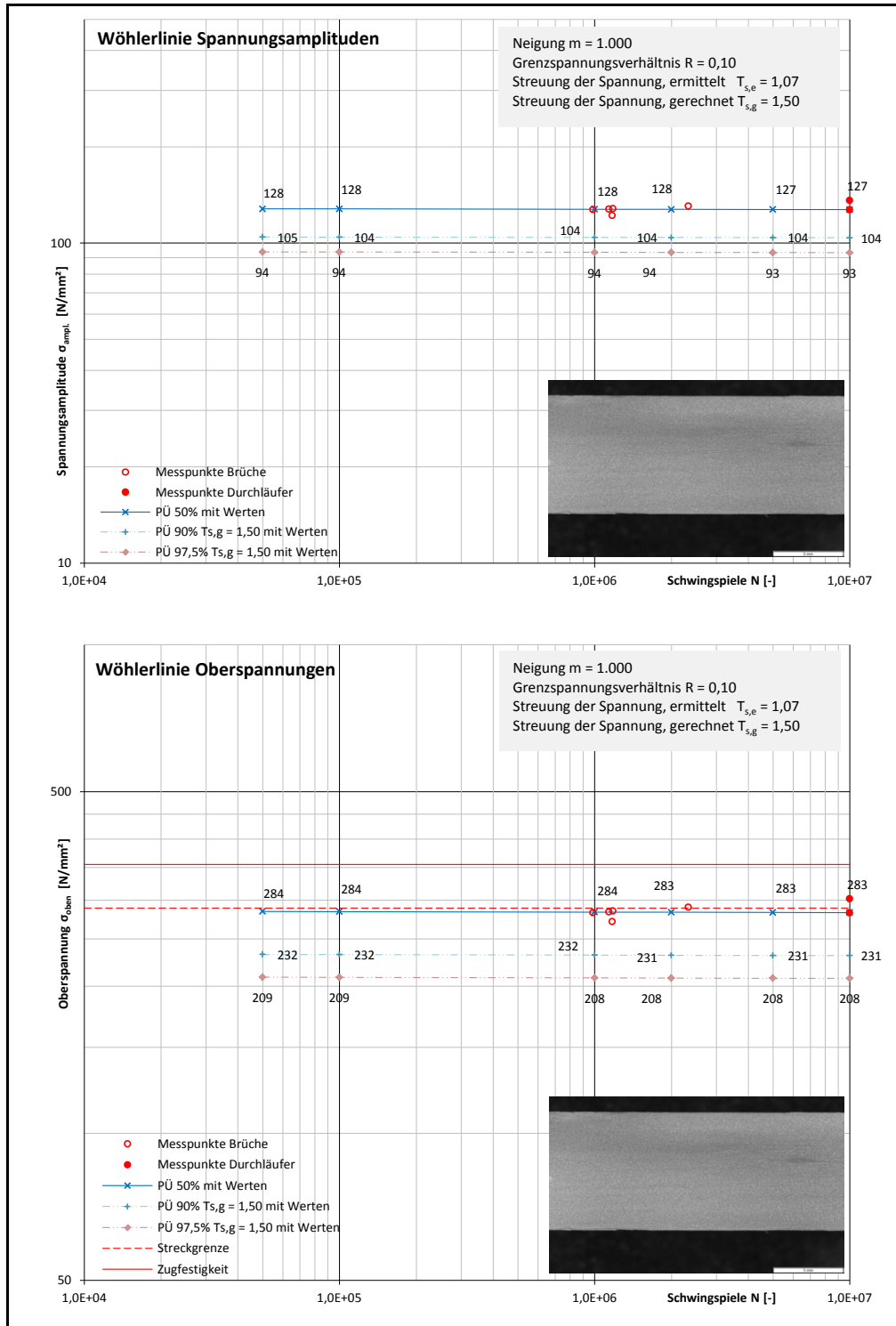
Chemie		Chemische Zusammensetzung [Massen-%]					
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,048	0,000	0,430	0,066	0,062	0,001	0,017
2	0,036	0,000	0,430	0,076	0,066	0,001	0,009
3	0,048	0,000	0,430	0,073	0,062	0,001	0,009
Im Mittel	0,044	0,000	0,430	0,072	0,063	0,001	0,012
Stahl	Thomasstahl (N), unberuhigt (Si, Al)						
Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]						
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>			
1	4	9	12	7			
2	3	6	39	28			
3	4	6	38	31			
Im Mittel	4	7	30	22			
Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden						
Mechanik	Mechanische Kennwerte						
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]			
1	289	355	67	28			
2							
3							
Im Mittel	289	355	67	28			
Stahl	S235 mit R <sub>eH</sub> > 235 N/mm² und R <sub>m</sub> ≈ 360 N/mm²						
<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C							
		Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			Proben gegläht bei 1.000 °C	
		Bez.	-20	0	20		
		1	7	46	185		
		2	28	52	222		
		3	31	62	232		
SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01		Im Mittel	22	53	213		

Probe Nr.:	G04-01
Herkunft:	Winkelstütze / ungeschweißt / FAT 160

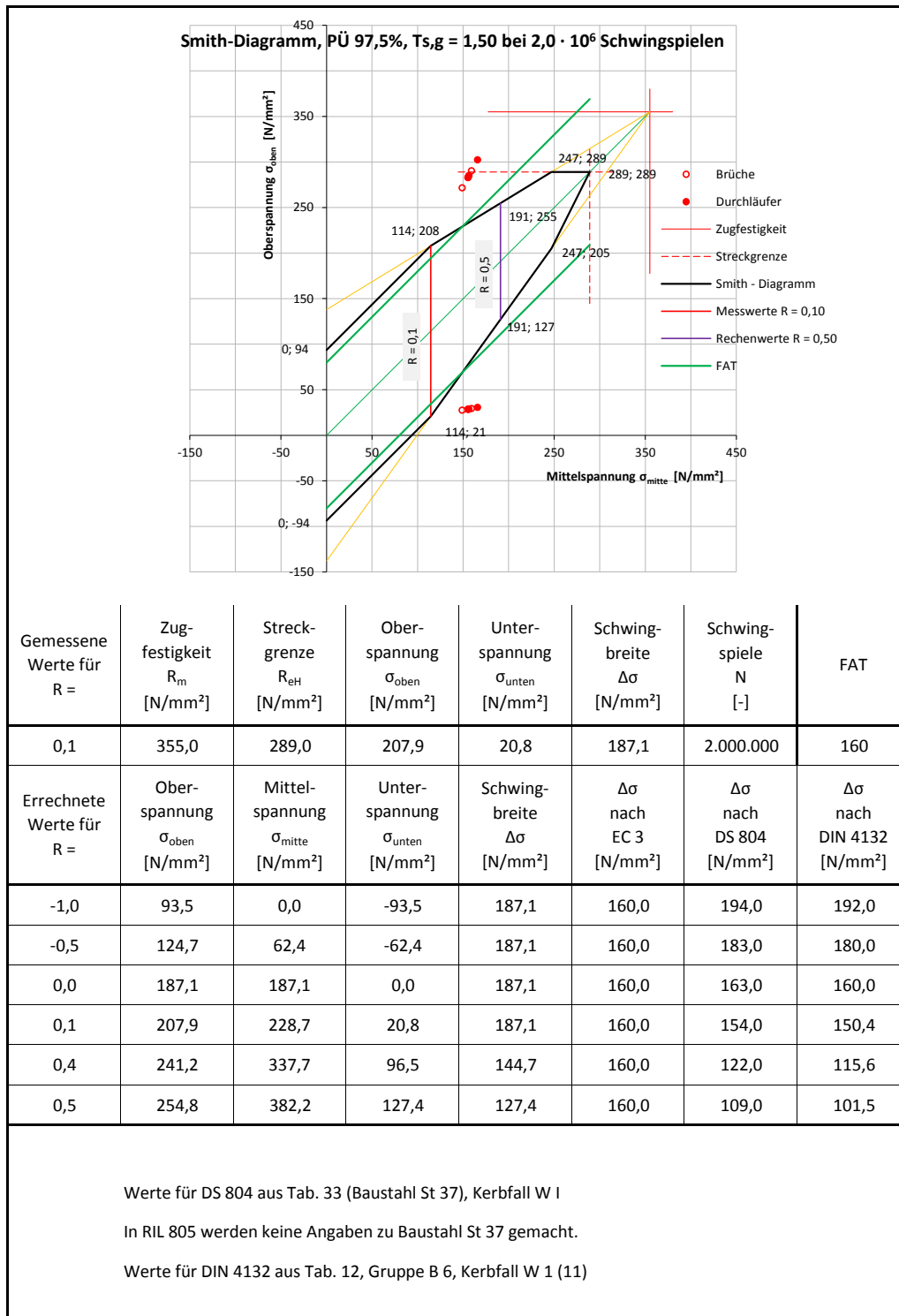
Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis		R =	0,10
	Grundmaterial, unbehandelt, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie		m =	1000,00
			Abknickpunkt bei		N <sub>B</sub> =	1,00E+07
Bez.	Ober-spannung $\sigma_{\text{oben}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel-spannung $\sigma_{\text{mitte}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter-spannung $\sigma_{\text{unten}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs-amplitude $\sigma_{\text{ampl.}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	271,2	149,2	27,1	122,0	244,1	1.172.991
2	289,9	159,4	29,0	130,5	260,9	2.331.293
3	282,5	155,4	28,3	127,1	254,3	10.000.000
4	284,8	156,6	28,5	128,2	256,3	1.179.744
5	283,6	156,0	28,4	127,6	255,2	1.139.347
6	302,0	166,1	30,2	135,9	271,8	10.000.000
7	282,6	155,4	28,3	127,2	254,3	985.623
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0



Probe Nr.:	G04-01
Herkunft:	Winkelstütze / ungeschweißt / FAT 160

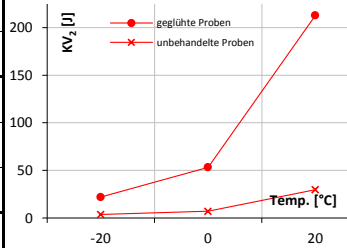
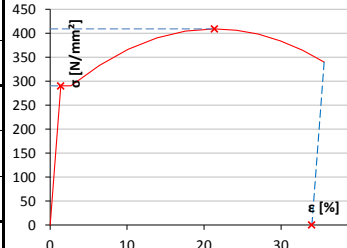


Probe Nr.:	G04-01
Herkunft:	Winkelstütze / ungeschweißt / FAT 160



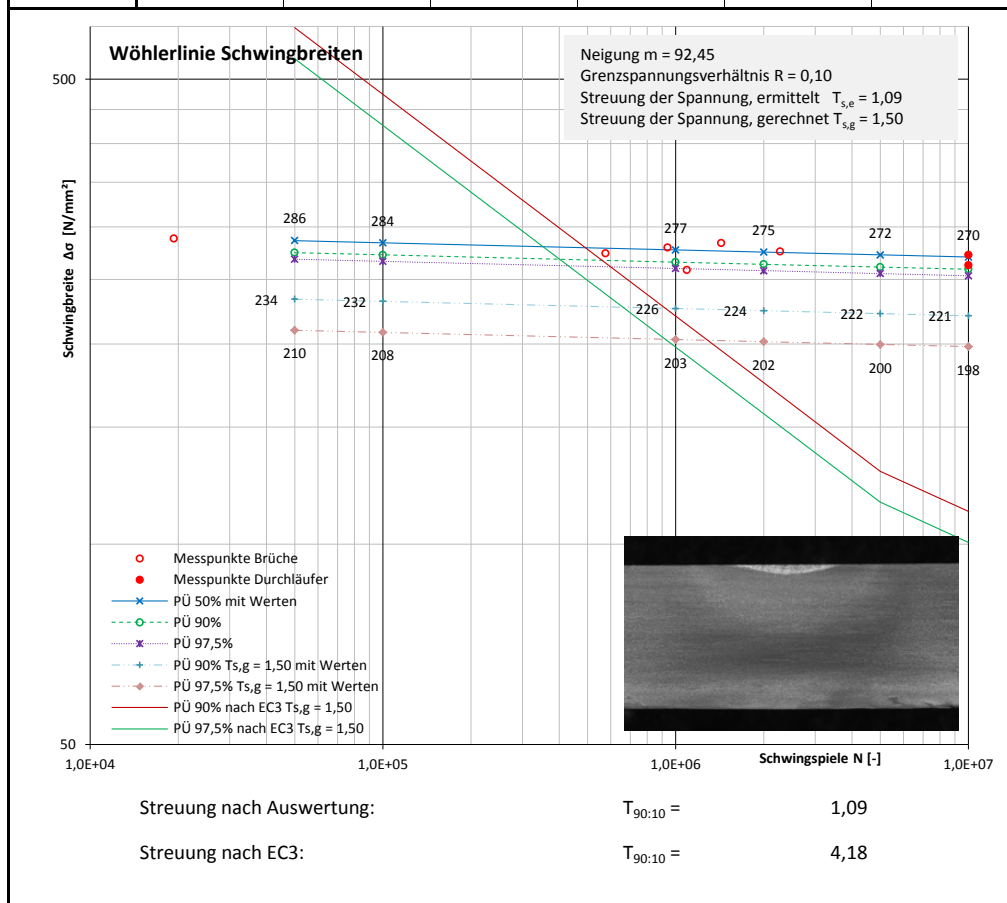
## **A.13 Probe G04-02**

Probe Nr.:	G04-02
Herkunft:	Winkelstütze / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160

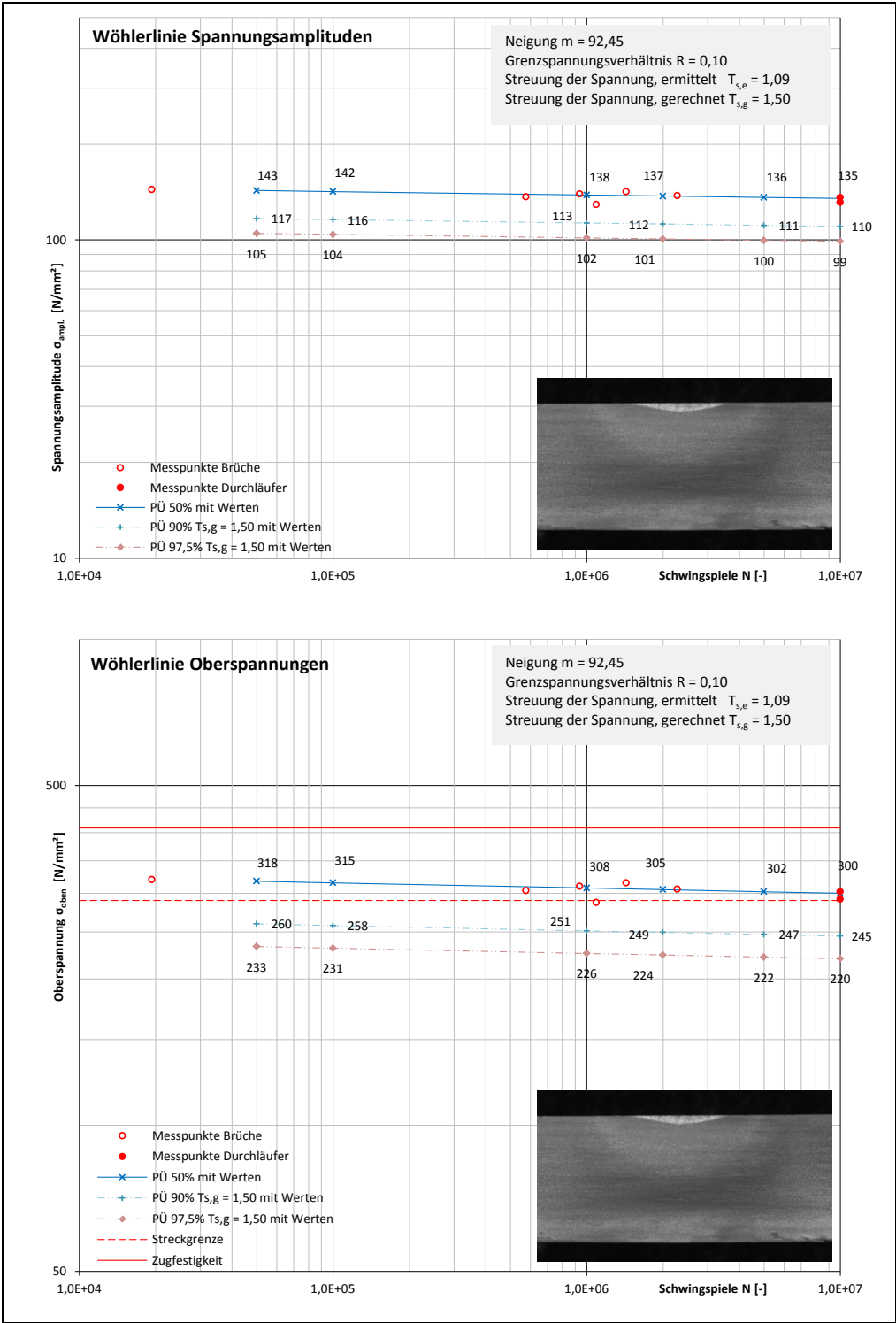
Chemie		Chemische Zusammensetzung [Massen-%]					
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,048	0,000	0,430	0,066	0,062	0,001	0,017
2	0,036	0,000	0,430	0,076	0,066	0,001	0,009
3	0,048	0,000	0,430	0,073	0,062	0,001	0,009
Im Mittel	0,044	0,000	0,430	0,072	0,063	0,001	0,012
Stahl	Thomasstahl (N), unberuhigt (Si, Al)						
Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]						
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>			
1	4	9	12	7			
2	3	6	39	28			
3	4	6	38	31			
Im Mittel	4	7	30	22			
Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden						
Mechanik	Mechanische Kennwerte						
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]			
1	290	409	65	34			
2							
3							
Im Mittel	290	409	65	34			
Stahl	S235 mit R <sub>eH</sub> > 235 N/mm² und R <sub>m</sub> ≈ 360 N/mm², geringe Verbesserung						
<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C							
		Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			Proben gegläht bei 1.000 °C	
		Bez.	-20	0	20		
		1	7	46	185		
		2	28	52	222		
		3	31	62	232		
		Im Mittel	22	53	213		
SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01							

Probe Nr.:	G04-02
Herkunft:	Winkelstütze / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis		R =	0,10
	Grundmaterial, Auftragsraupe, Abschleiß, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie		m =	92,45
			Abknickpunkt bei		N <sub>B</sub> =	1,00E+07
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	287,0	157,9	28,7	129,2	258,3	1.092.334
2	320,1	176,1	32,0	144,0	288,1	19.325
3	310,1	170,6	31,0	139,5	279,1	940.098
4	303,9	167,1	30,4	136,8	273,5	576.569
5	306,0	168,3	30,6	137,7	275,4	2.276.639
6	315,0	173,3	31,5	141,8	283,5	1.432.233
7	291,7	160,4	29,2	131,3	262,5	10.000.000
8	302,3	166,3	30,2	136,0	272,1	10.000.000

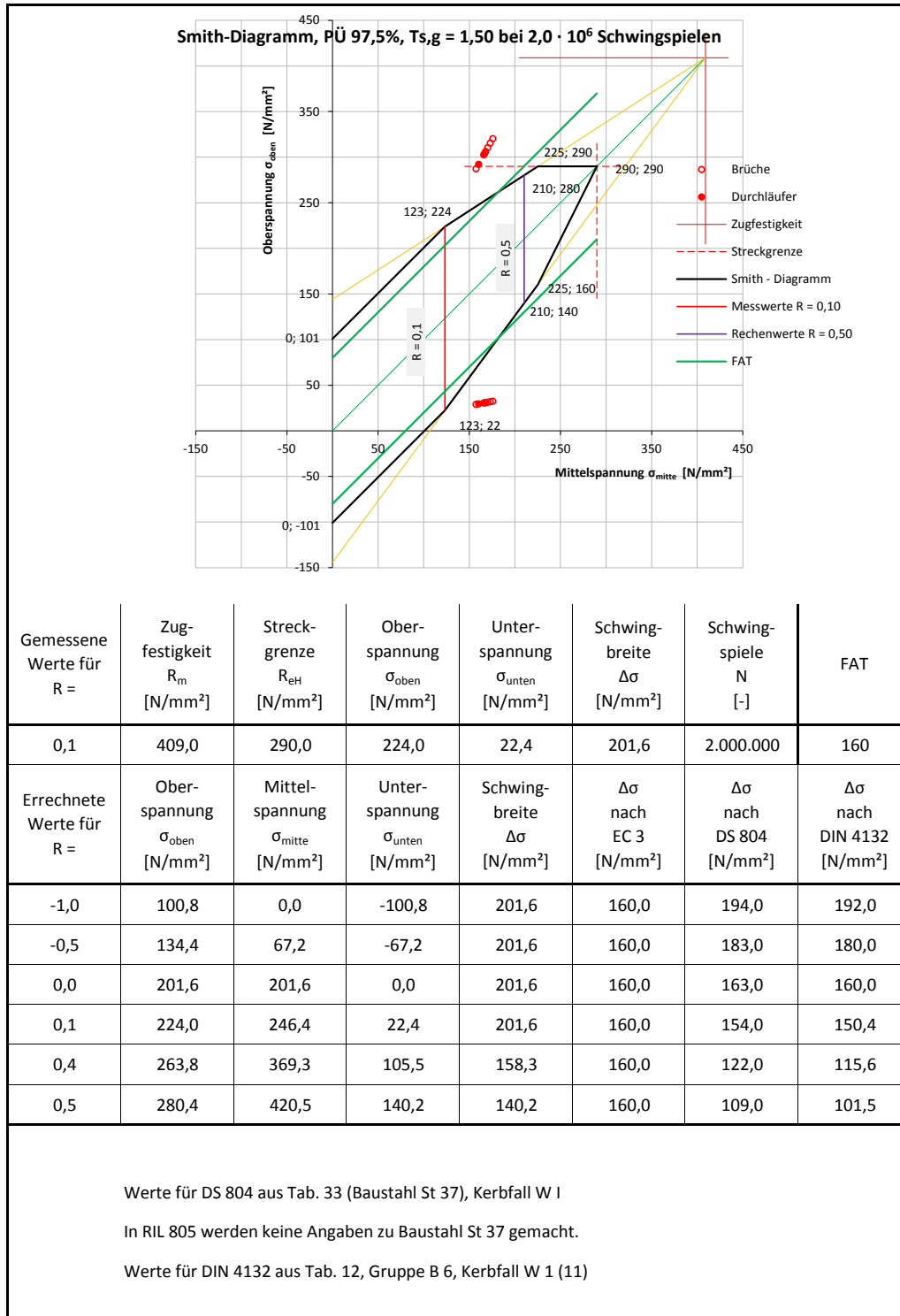


Probe Nr.:	G04-02
Herkunft:	Winkelstütze / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160





Probe Nr.:	G04-02
Herkunft:	Winkelstütze / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160



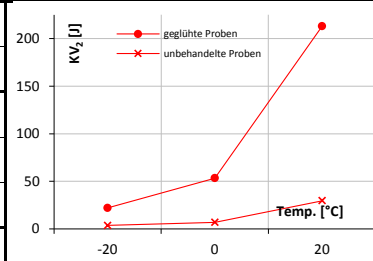
## **A.14 Probe G04-03**

Probe Nr.:	G04-03
Herkunft:	Winkelstütze / Vollnaht eingeebnet / FAT 112

Chemie	Chemische Zusammensetzung [Massen-%]						
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,048	0,000	0,430	0,066	0,062	0,001	0,017
2	0,036	0,000	0,430	0,076	0,066	0,001	0,009
3	0,048	0,000	0,430	0,073	0,062	0,001	0,009
Im Mittel	0,044	0,000	0,430	0,072	0,063	0,001	0,012

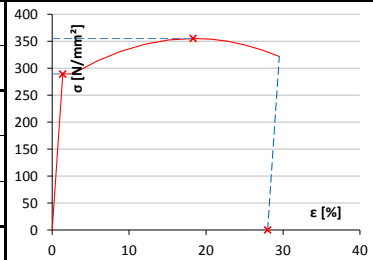
Stahl	Thomasstahl (N), unberuhigt (Si, Al)
-------	--------------------------------------

Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>
1	4	9	12	7
2	3	6	39	28
3	4	6	38	31
Im Mittel	4	7	30	22



Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden
-------	---

Mechanik	Mechanische Kennwerte			
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]
1	289	355	67	28
2				
3				
Im Mittel	289	355	67	28



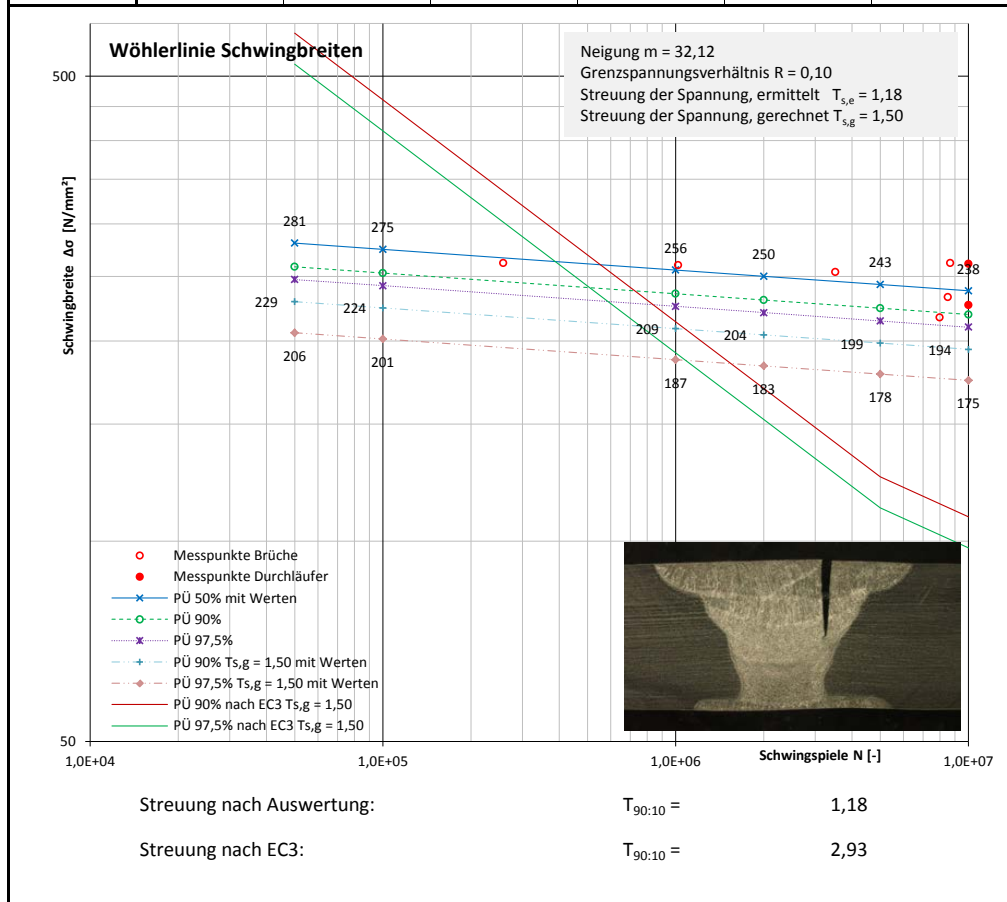
Stahl	S235 mit R <sub>eH</sub> > 235 N/mm <sup>2</sup> und R <sub>m</sub> ≈ 360 N/mm <sup>2</sup>
-------	---

<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C	Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			Proben gegläht bei 1.000 °C
	Bez.	-20	0	20	
	1	7	46	185	
	2	28	52	222	
	3	31	62	232	
	Im Mittel	22	53	213	

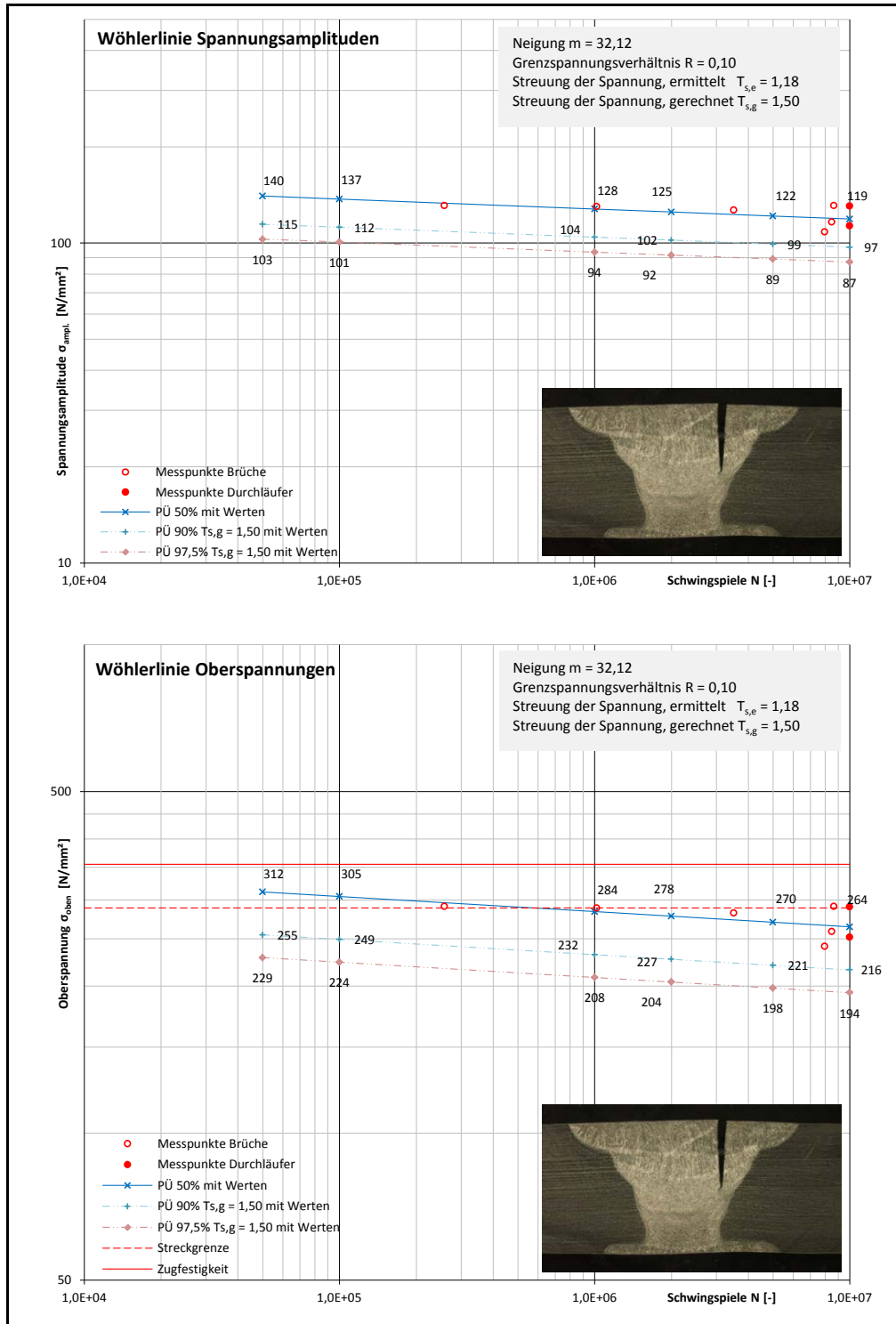
SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01

Probe Nr.:	G04-03
Herkunft:	Winkelstütze / Vollnaht eingeebnet / FAT 112

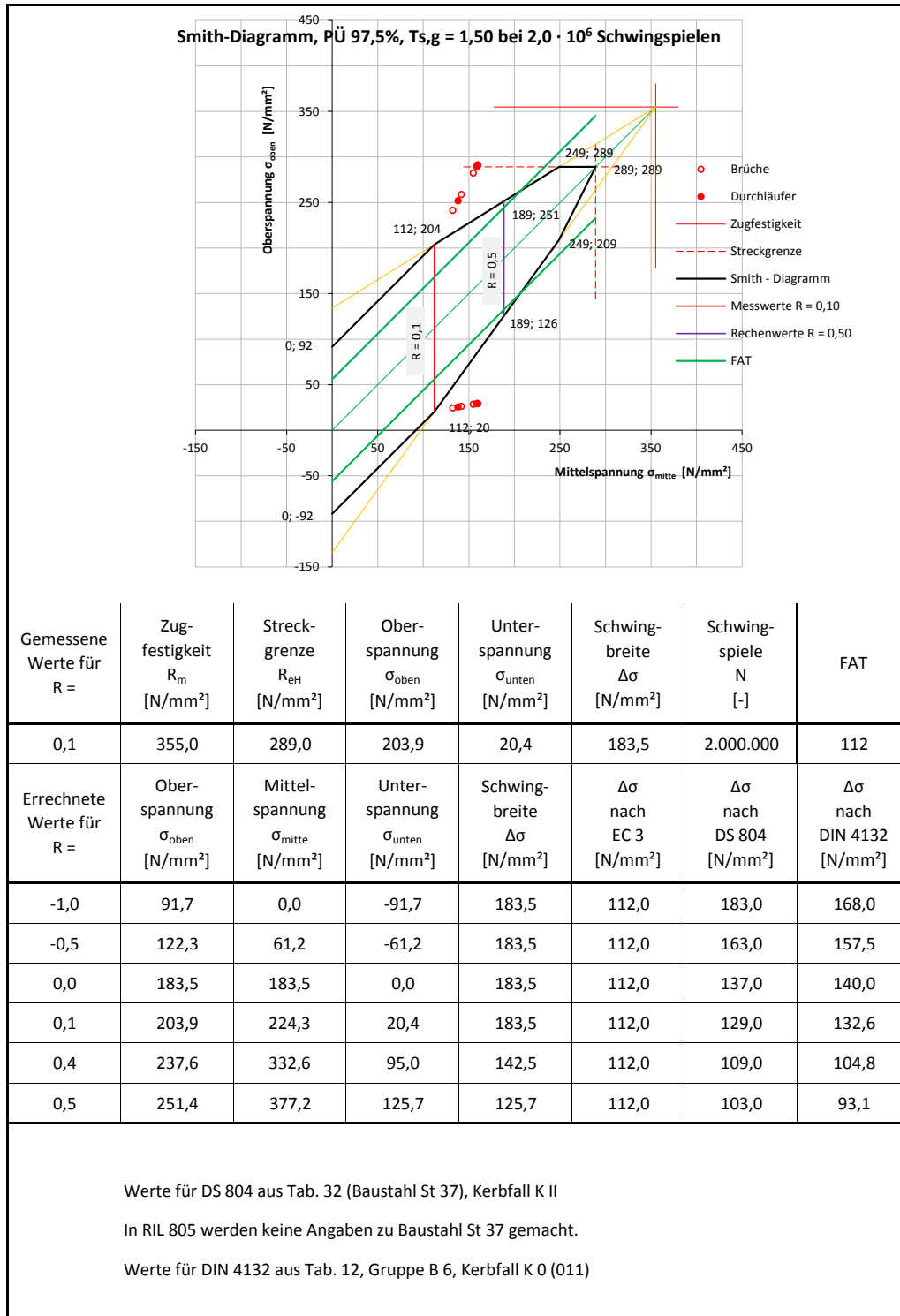
Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis		R =	0,10
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 112		Neigung der Wöhlerlinie		m =	32,12
			Abknickpunkt bei		N <sub>B</sub> =	1,00E+07
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	291,1	160,1	29,1	131,0	262,0	257.907
2	241,0	132,6	24,1	108,5	216,9	7.987.418
3	258,6	142,2	25,9	116,4	232,7	8.506.475
4	282,0	155,1	28,2	126,9	253,8	3.512.048
5	288,9	158,9	28,9	130,0	260,0	1.020.784
6	290,9	160,0	29,1	130,9	261,8	8.676.849
7	290,3	159,7	29,0	130,6	261,3	10.000.000
8	251,7	138,4	25,2	113,3	226,5	10.000.000



Probe Nr.:	G04-03
Herkunft:	Winkelstütze / Vollnaht eingeebnet / FAT 112



Probe Nr.:	G04-03
Herkunft:	Winkelstütze / Vollnaht eingeebnet / FAT 112



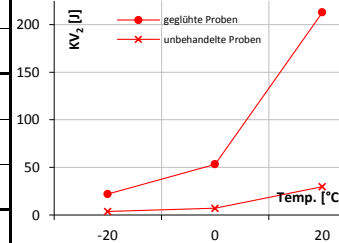
**A.15 Probe G04-04**

Probe Nr.:	G04-04
Herkunft:	Winkelstütze / Vollnaht / FAT 90

Chemie	Chemische Zusammensetzung [Massen-%]						
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
1	0,048	0,000	0,430	0,066	0,062	0,001	0,017
2	0,036	0,000	0,430	0,076	0,066	0,001	0,009
3	0,048	0,000	0,430	0,073	0,062	0,001	0,009
Im Mittel	0,044	0,000	0,430	0,072	0,063	0,001	0,012

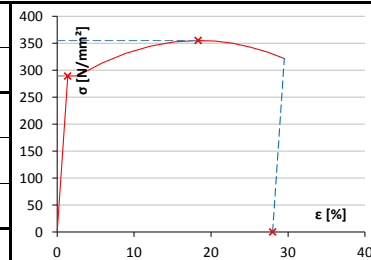
Stahl	Thomasstahl (N), unberuhigt (Si, Al)
-------	--------------------------------------

Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>
1	4	9	12	7
2	3	6	39	28
3	4	6	38	31
Im Mittel	4	7	30	22



Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden
-------	---

Mechanik	Mechanische Kennwerte			
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]
1	289	355	67	28
2				
3				
Im Mittel	289	355	67	28



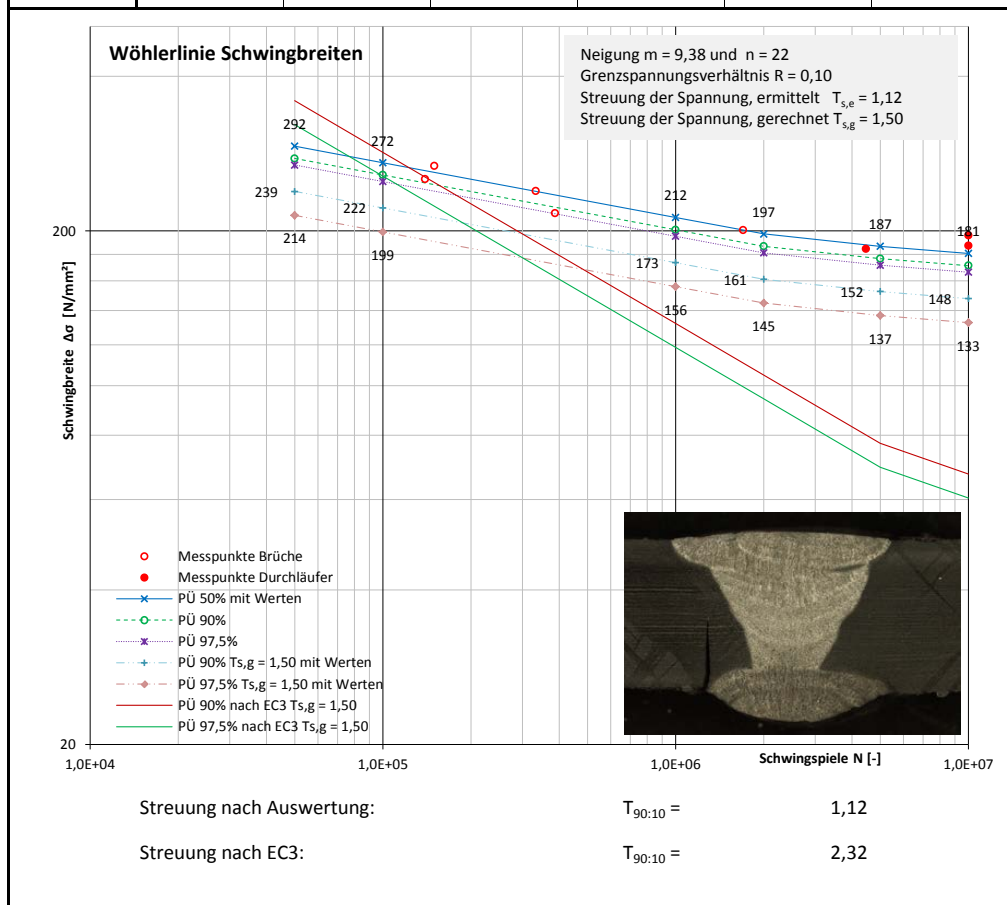
Stahl	S235 mit R <sub>eH</sub> > 235 N/mm <sup>2</sup> und R <sub>m</sub> ≈ 360 N/mm <sup>2</sup>
-------	---

<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C  SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01	Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]			Proben gegläht bei 1.000 °C
	Bez.	-20	0	20	
	1	7	46	185	
	2	28	52	222	
	3	31	62	232	
	Im Mittel	22	53	213	

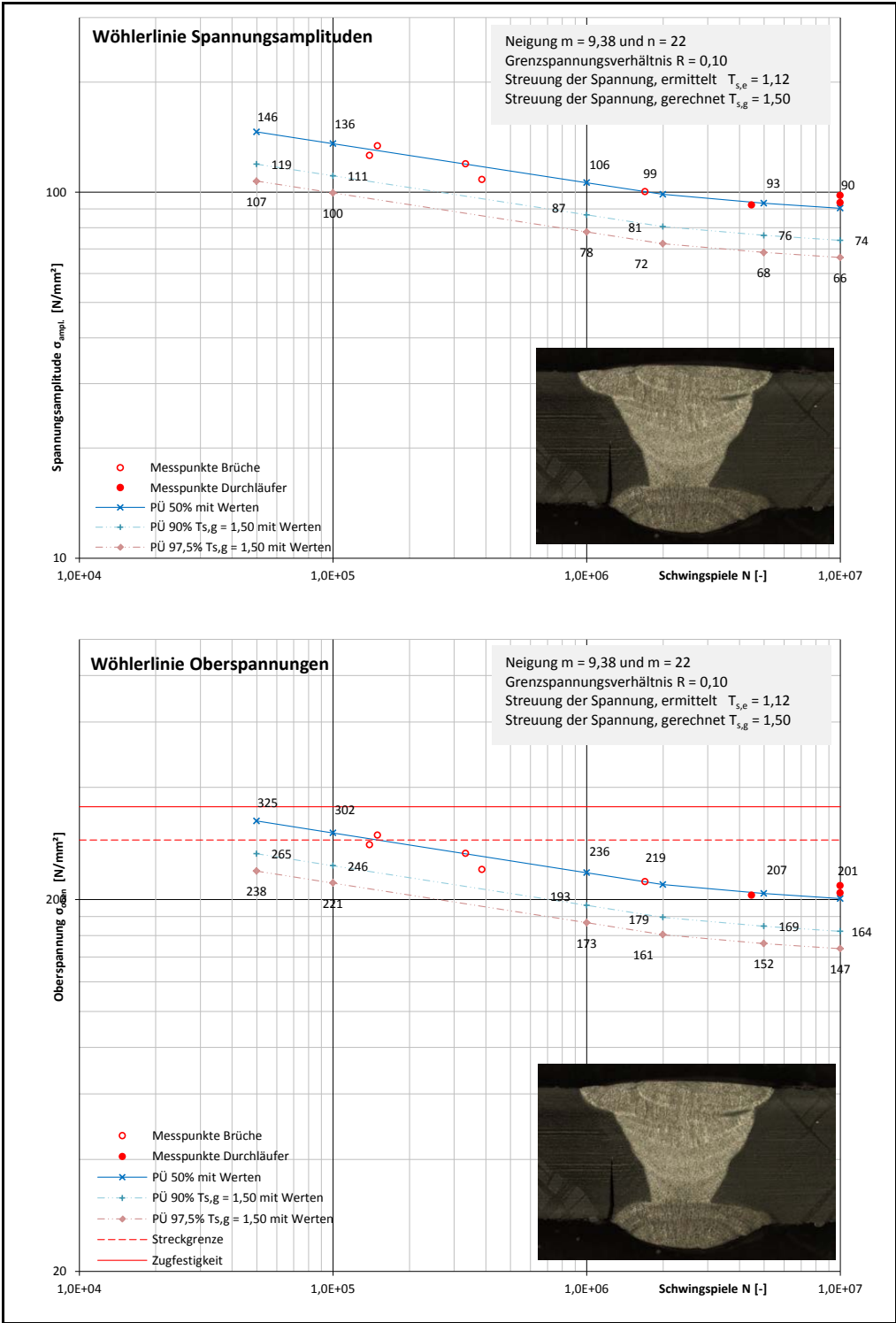


Probe Nr.:	G04-04
Herkunft:	Winkelstütze / Vollnaht / FAT 90

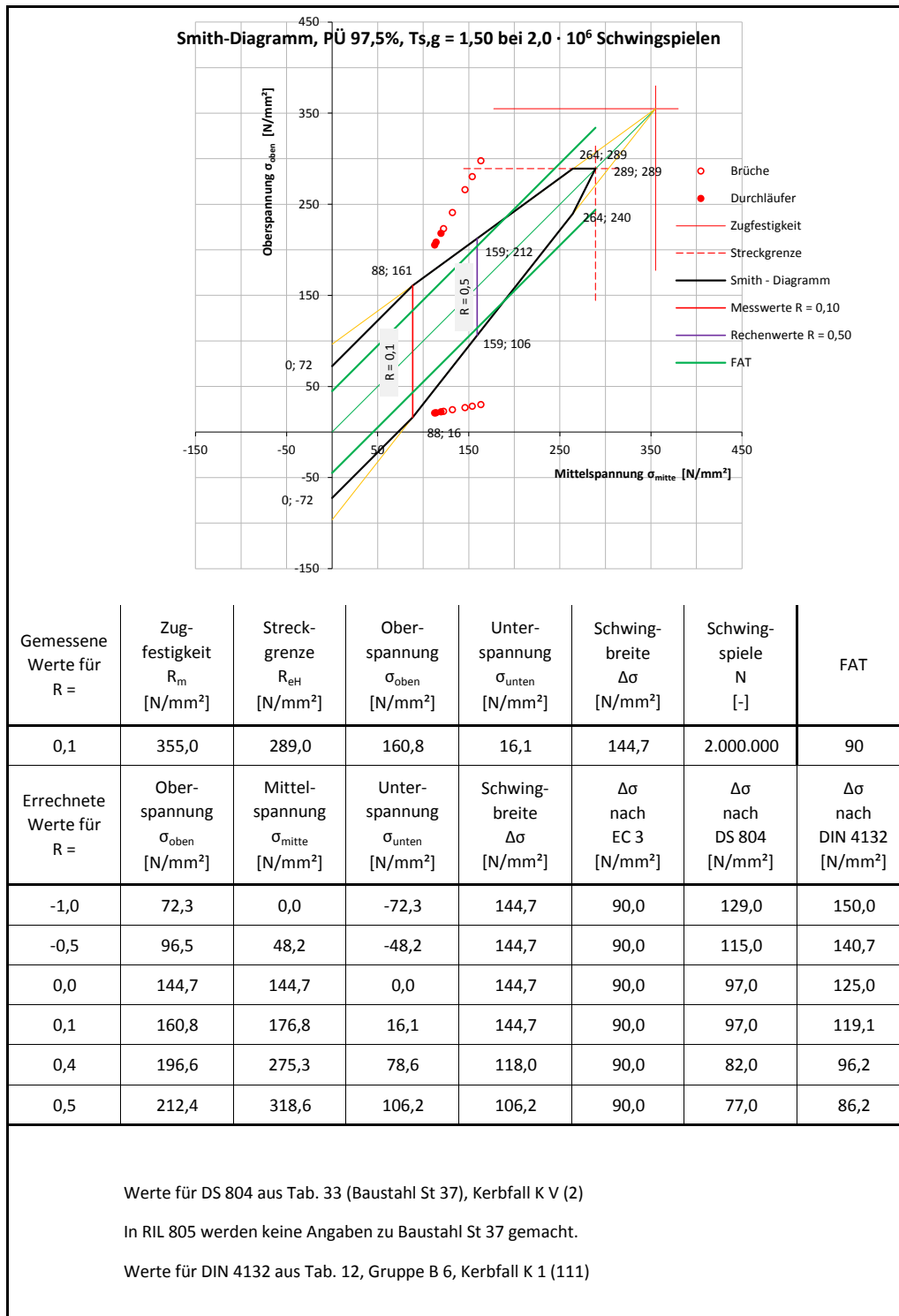
Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis $R =$		0,10	
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht FAT 90		Neigung der Wöhlerlinie $m =$		9,38	
			Abknickpunkt bei $N_B =$		2,50E+06	
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	297,5	163,6	29,8	133,9	267,8	149.943
2	280,1	154,1	28,0	126,0	252,1	139.605
3	265,6	146,1	26,6	119,5	239,0	333.308
4	240,6	132,3	24,1	108,3	216,5	387.230
5	205,1	112,8	20,5	92,3	184,6	4.469.959
6	208,0	114,4	20,8	93,6	187,2	10.000.000
7	217,7	119,7	21,8	98,0	195,9	10.000.000
8	223,0	122,7	22,3	100,4	200,7	1.701.467



Probe Nr.:	G04-04
Herkunft:	Winkelstütze / Vollnaht / FAT 90

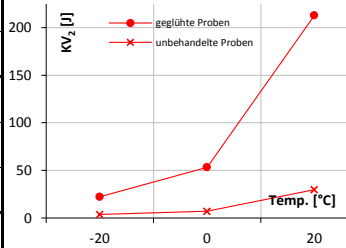
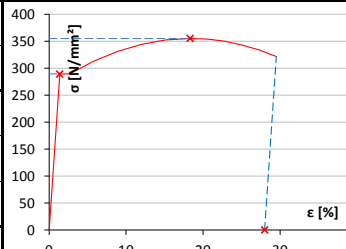


Probe Nr.:	G04-04
Herkunft:	Winkelstütze / Vollnaht / FAT 90



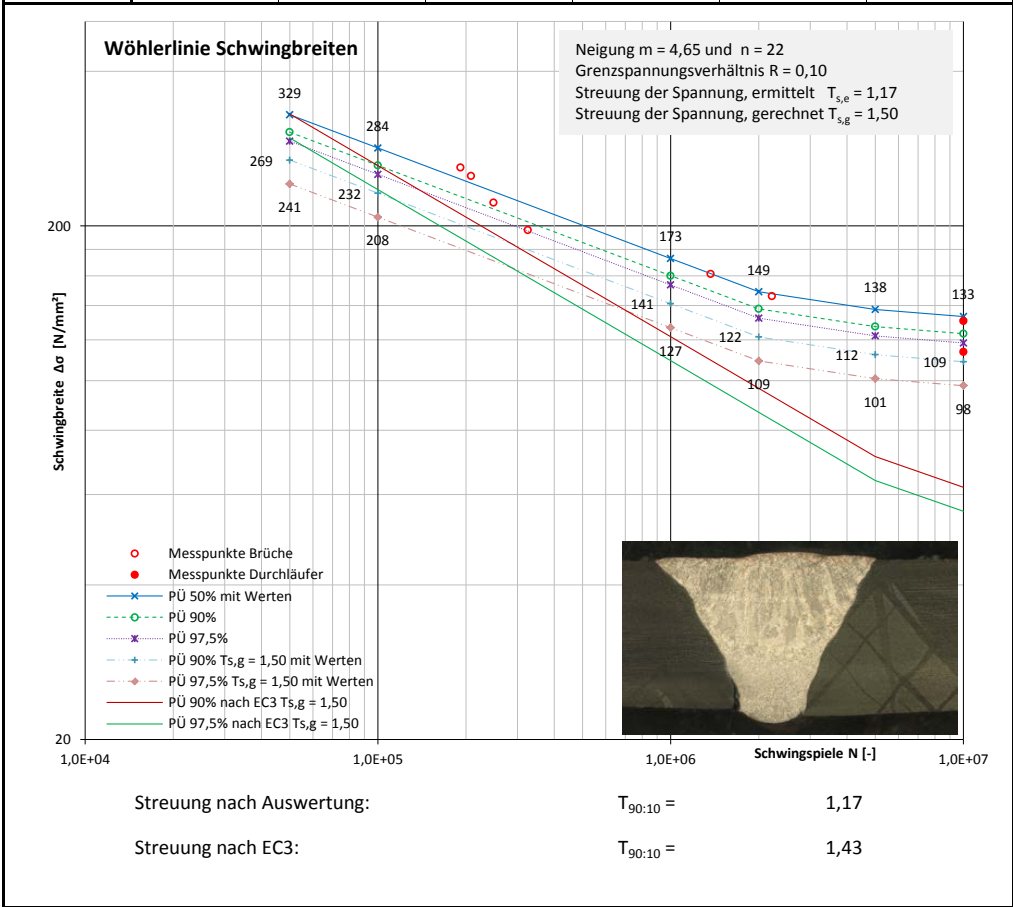
## **A.16 Probe G04-05**

Probe Nr.:	G04-05
Herkunft:	Winkelstütze / Vollnaht / FAT 71

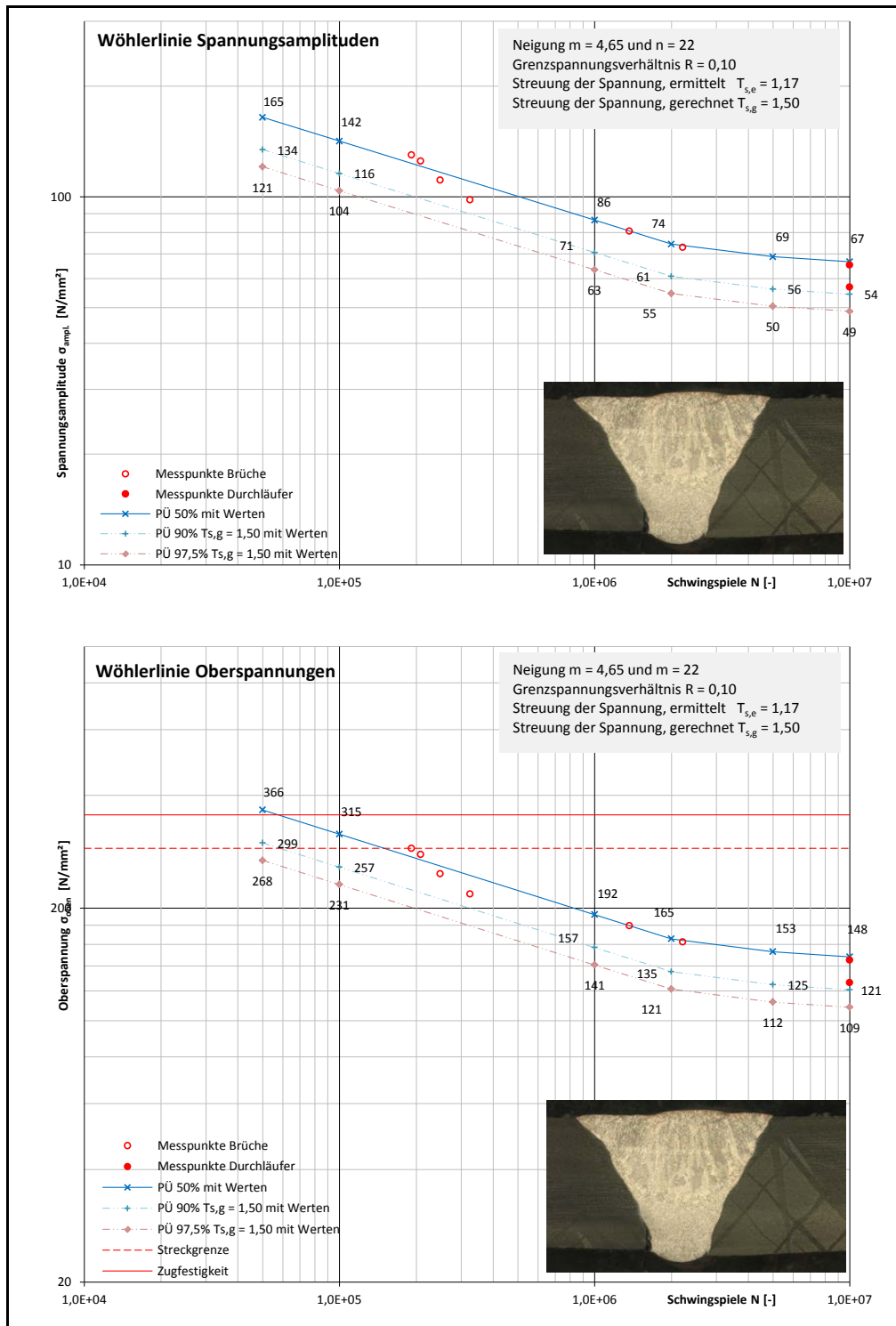
Chemie		Chemische Zusammensetzung [Massen-%]						
Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	N	
1	0,048	0,000	0,430	0,066	0,062	0,001	0,017	
2	0,036	0,000	0,430	0,076	0,066	0,001	0,009	
3	0,048	0,000	0,430	0,073	0,062	0,001	0,009	
Im Mittel	0,044	0,000	0,430	0,072	0,063	0,001	0,012	
Stahl	Thomasstahl (N), unberuhigt (Si, Al)							
Zähigkeit	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]							
Bez.	-20	0	20	-20 <sup>1)</sup>				
1	4	9	12	7				
2	3	6	39	28				
3	4	6	38	32				
Im Mittel	4	7	30	22				
Stahl	stark versprödeter Stahl, praktisch keine Restzähigkeit vorhanden							
Mechanik	Mechanische Kennwerte							
Bez.	R <sub>eH</sub> [N/mm²]	R <sub>m</sub> [N/mm²]	Z [%]	A <sub>5</sub> [%]				
1	289	355	67	28				
2								
3								
Im Mittel	289	355	67	28				
Stahl	S235 mit R <sub>eH</sub> > 235 N/mm² und R <sub>m</sub> ≈ 360 N/mm²							
<sup>1)</sup> Probe gegläht bei 1.000 °C								
		Zähigkeit	KV <sub>2</sub> [J] bei Prüftemperatur [°C]		Proben gegläht bei 1.000 °C			
		Bez.	-20	0				20
		1	7	46				185
		2	28	52				222
		3	32	62				232
		Im Mittel	22	53				213
SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01								

Probe Nr.:	G04-05
Herkunft:	Winkelstütze / Vollnaht / FAT 71

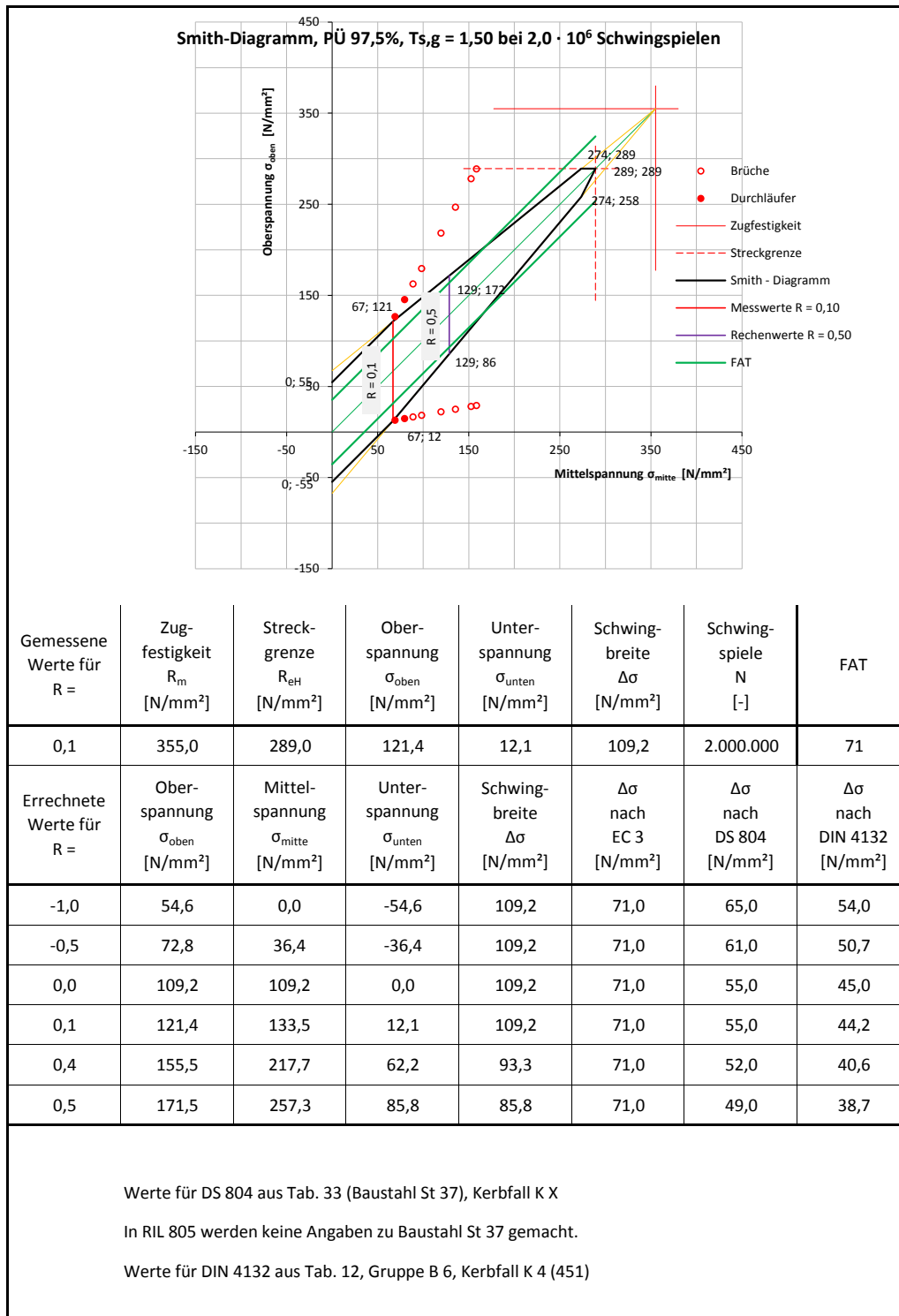
Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis		R =	0,10
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht FAT 71		Neigung der Wöhlerlinie		m =	4,65
			Abknickpunkt bei		N <sub>B</sub> =	2,50E+06
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{\text{oben}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{\text{mitte}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{\text{unten}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{\text{ampl.}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
1	288,6	158,7	28,9	129,9	259,7	191.780
2	277,8	152,8	27,8	125,0	250,0	208.424
3	246,6	135,6	24,7	111,0	221,9	248.647
4	218,0	119,9	21,8	98,1	196,2	325.459
5	179,2	98,6	17,9	80,6	161,3	1.369.941
6	162,1	89,2	16,2	72,9	145,9	2.217.796
7	126,3	69,5	12,6	56,8	113,7	10.000.000
8	145,1	79,8	14,5	65,3	130,6	10.000.000



Probe Nr.:	G04-05
Herkunft:	Winkelstütze / Vollnaht / FAT 71



Probe Nr.:	G04-05
Herkunft:	Winkelstütze / Vollnaht / FAT 71





## **A.17 Zusammenfassung Proben FAT 160**

Probe Nr.:	Übersicht über alle gleichartigen Proben
Herkunft:	Grundmaterial / ungeschweißt / FAT 160

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis R = 0,10			
	Grundmaterial, unbehandelt, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie m = 7,04		Abknickpunkt bei N <sub>B</sub> = 2,50E+06	
Bez.	Ober- spannung σ <sub>oben</sub> [N/mm²]	Mittel- spannung σ <sub>mitte</sub> [N/mm²]	Unter- spannung σ <sub>unten</sub> [N/mm²]	Spannungs- amplitude σ <sub>ampl.</sub> [N/mm²]	Schwingbreite Δσ [N/mm²]	Schwingspiele N [-]
1	274,4	150,9	27,4	123,5	247,0	1.350.999
2	333,3	183,3	33,3	150,0	300,0	1.086.168
3	353,7	194,5	35,4	159,2	318,3	415.979
4	342,8	188,5	34,3	154,3	308,5	824.019
5	282,0	155,1	28,2	126,9	253,8	1.092.553
6	257,7	141,7	25,8	116,0	231,9	10.000.000
7	270,9	149,0	27,1	121,9	243,8	10.000.000
8	297,0	163,4	29,7	133,7	267,3	2.207.250
9	228,8	125,8	22,9	103,0	205,9	779.782
10	217,4	119,6	21,7	97,8	195,7	916.784
11	210,6	115,8	21,1	94,8	189,5	1.685.462
12	229,4	126,2	22,9	103,2	206,5	800.867
13	228,4	125,6	22,8	102,8	205,6	776.551
14	195,7	107,6	19,6	88,1	176,1	10.000.000
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
17	222,2	122,2	22,2	100,0	200,0	1.197.028
18	229,9	126,4	23,0	103,5	206,9	1.175.394
19	220,7	121,4	22,1	99,3	198,6	1.925.642
20	187,7	103,2	18,8	84,5	168,9	10.000.000
21	203,3	111,8	20,3	91,5	183,0	10.000.000
22	212,7	117,0	21,3	95,7	191,4	10.000.000
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
25	320,0	176,0	32,0	144,0	288,0	594.760
26	349,9	192,4	35,0	157,5	314,9	173.397
27	349,9	192,4	35,0	157,5	314,9	481.314
SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01			Anzahl der Proben			35

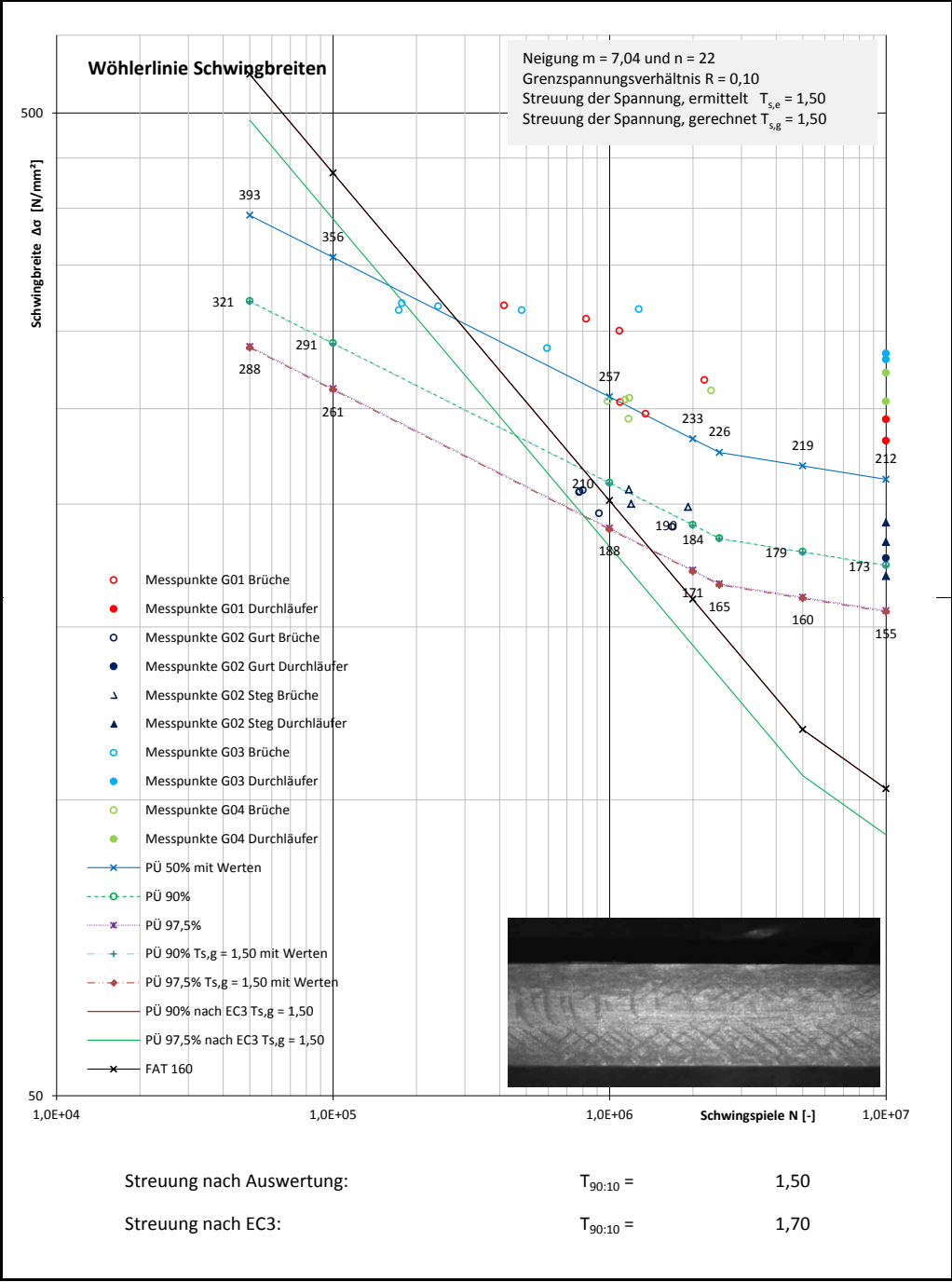
## A.17 Zusammenfassung Proben FAT 160

<b>Probe Nr.:</b>	<b>Übersicht über alle gleichartigen Proben</b>
<b>Herkunft:</b>	<b>Grundmaterial / ungeschweißt / FAT 160</b>

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis R = 0,10			
	Grundmaterial, unbehandelt, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie m = 7,04			
			Abknickpunkt bei $N_B = 2,50E+06$			
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
28	316,2	173,9	31,6	142,3	284,6	10.000.000
29	355,5	195,5	35,6	160,0	320,0	177.676
30	311,8	171,5	31,2	140,3	280,6	10.000.000
31	353,1	194,2	35,3	158,9	317,8	240.395
32	350,7	192,9	35,1	157,8	315,6	1.276.660
33	271,2	149,2	27,1	122,0	244,1	1.172.991
34	289,9	159,4	29,0	130,5	260,9	2.331.293
35	282,5	155,4	28,3	127,1	254,3	10.000.000
36	284,8	156,6	28,5	128,2	256,3	1.179.744
37	283,6	156,0	28,4	127,6	255,2	1.139.347
38	302,0	166,1	30,2	135,9	271,8	10.000.000
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
40	282,6	155,4	28,3	127,2	254,3	985.623
<p>Schwingbreite bei 2 Mio. Schwingspielen mit 97,5% Überlebenswahrscheinlichkeit und 1,50-facher Spannungsstreuung <math>\Delta\sigma</math> [N/mm<sup>2</sup>] = 170,8</p>						
<p>Proben 1-8 G01 Proben 25-32 G03</p> <p>Proben 9-16 G02 Gurt Proben 33-40 G04</p> <p>Proben 17-24 G02 Steg</p>						

Probe Nr.:	Übersicht über alle gleichartigen Proben
Herkunft:	Grundmaterial / ungeschweißt / FAT 160

Wöhler:	Ergebnis der Schwingversuche	Grenzspannungsverhältnis	R =	0,10
	Grundmaterial, unbehandelt, Rostnarben, FAT 160	Neigung der Wöhlerlinie	m =	7,04
		Abknickpunkt bei	N <sub>B</sub> =	2,50E+06



## **A.18 Zusammenfassung Proben FAT 160 mit WEZ**

Probe Nr.:	Übersicht über alle gleichartigen Proben
Herkunft:	Grundmaterial / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis R = 0,10			
	Grundmaterial, Auftragsraupe, Abschliff, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie m = 39,39		Abknickpunkt bei N <sub>B</sub> = 2,50E+06	
Bez.			Unter- spannung $\sigma_{\text{unten}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{\text{ampl.}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
	Ober- spannung $\sigma_{\text{oben}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{\text{mitte}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]				
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
9	261,5	143,8	26,2	117,7	235,4	360.881
10	254,6	140,0	25,5	114,6	229,1	1.005.675
11	264,7	145,6	26,5	119,1	238,2	626.210
12	250,3	137,7	25,0	112,6	225,3	784.496
13	186,2	102,4	18,6	83,8	167,6	10.000.000
14	219,1	120,5	21,9	98,6	197,2	10.000.000
15	228,7	125,8	22,9	102,9	205,8	10.000.000
16	238,9	131,4	23,9	107,5	215,0	10.000.000
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
25	328,0	180,4	32,8	147,6	295,2	7.904.496
26	330,7	181,9	33,1	148,8	297,6	6.846.067
27	374,6	206,0	37,5	168,6	337,1	314.386
SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01			Anzahl der Proben			24

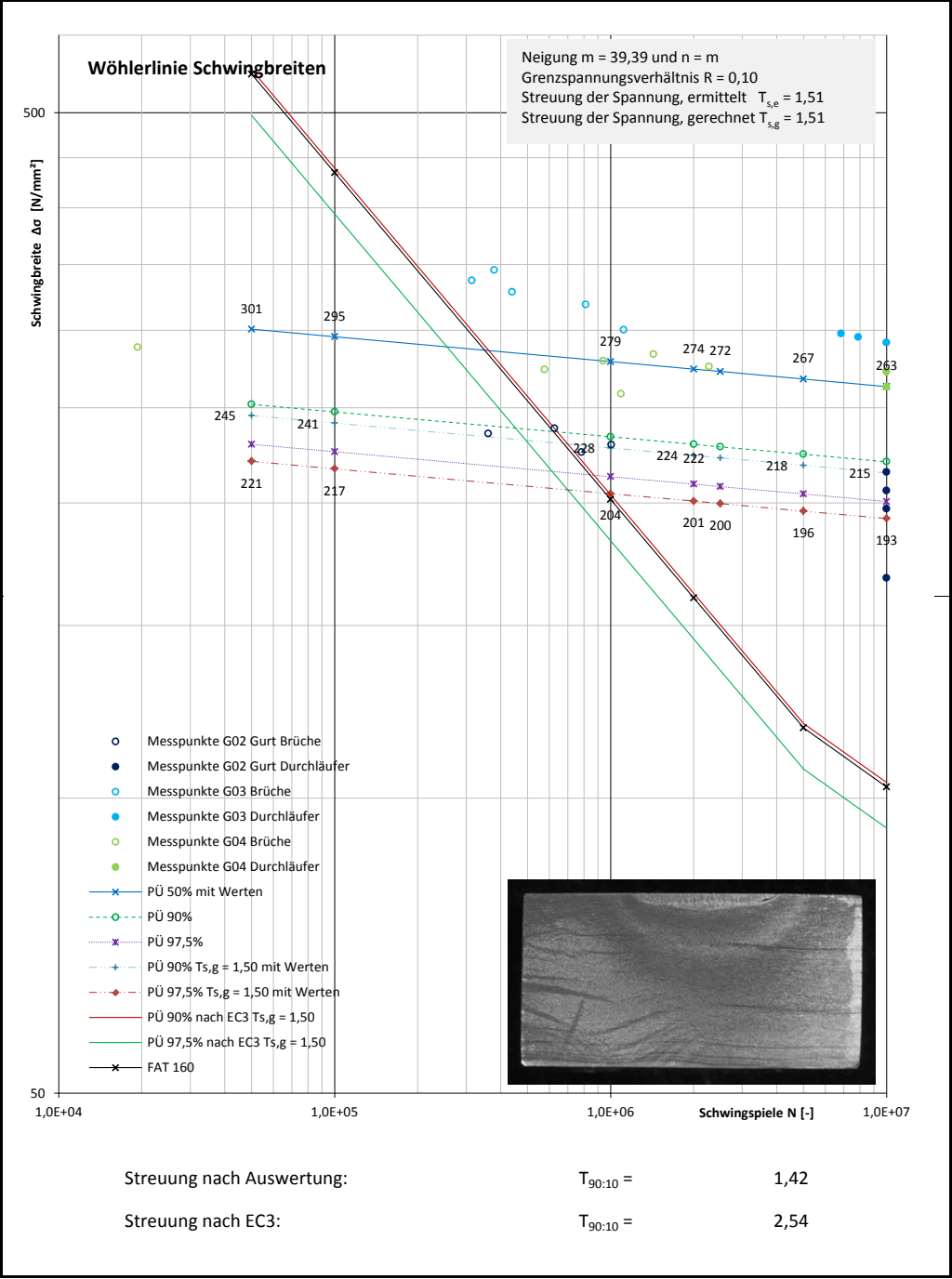
## A.18 Zusammenfassung Proben FAT 160 mit WEZ

<b>Probe Nr.:</b>	<b>Übersicht über alle gleichartigen Proben</b>
<b>Herkunft:</b>	<b>Grundmaterial / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160</b>

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis R = 0,10			
	Grundmaterial, Auftragsraupe, Abschliff, Rostnarben, FAT 160		Neigung der Wöhlerlinie m = 39,39			
			Abknickpunkt bei $N_B = 2,50E+06$			
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
28	323,8	178,1	32,4	145,7	291,4	10.000.000
29	383,7	211,0	38,4	172,7	345,3	378.657
30	364,5	200,5	36,5	164,0	328,1	439.985
31	353,9	194,6	35,4	159,3	318,5	812.931
32	333,6	183,5	33,4	150,1	300,2	1.116.825
33	287,0	157,9	28,7	129,2	258,3	1.092.334
34	320,1	176,1	32,0	144,0	288,1	19.325
35	310,1	170,6	31,0	139,5	279,1	940.098
36	303,9	167,1	30,4	136,8	273,5	576.569
37	306,0	168,3	30,6	137,7	275,4	2.276.639
38	315,0	173,3	31,5	141,8	283,5	1.432.233
39	291,7	160,4	29,2	131,3	262,5	10.000.000
40	302,3	166,3	30,2	136,0	272,1	10.000.000
<p>Schwingbreite bei 2 Mio. Schwingspielen mit 97,5% Überlebenswahrscheinlichkeit und 1,50-facher Spannungsstreuung <math>\Delta\sigma</math> [N/mm<sup>2</sup>] = 200,8</p>						
<p>Proben 1-8 G01 Proben 25-32 G03</p>						
<p>Proben 9-16 G02 Gurt Proben 33-40 G04</p>						
<p>Proben 17-24 G02 Steg</p>						

Probe Nr.:	Übersicht über alle gleichartigen Proben
Herkunft:	Grundmaterial / geschweißt und beschliffen WEZ / FAT 160

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche	Grenzspannungsverhältnis	R =	0,10
	Grundmaterial, Auftragsraupe, Abschleiß, Rostnarben, FAT 160	Neigung der Wöhlerlinie	m =	39,39
		Abknickpunkt bei	N <sub>B</sub> =	2,50E+06





## **A.19 Zusammenfassung Proben FAT 112**

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis R = 0,10			
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 112		Neigung der Wöhlerlinie m = 15,16			
			Abknickpunkt bei N <sub>B</sub> = 2,50E+06			
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm²]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm²]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm²]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm²]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm²]	Schwingspiele N [-]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
25	317,5	174,6	31,8	142,9	285,8	262.284
26	297,4	163,6	29,7	133,8	267,7	604.050
27	360,3	198,2	36,0	162,1	324,3	68.141

SLV Halle: ZP-210-610-13-001-01+01

Anzahl der Proben

16

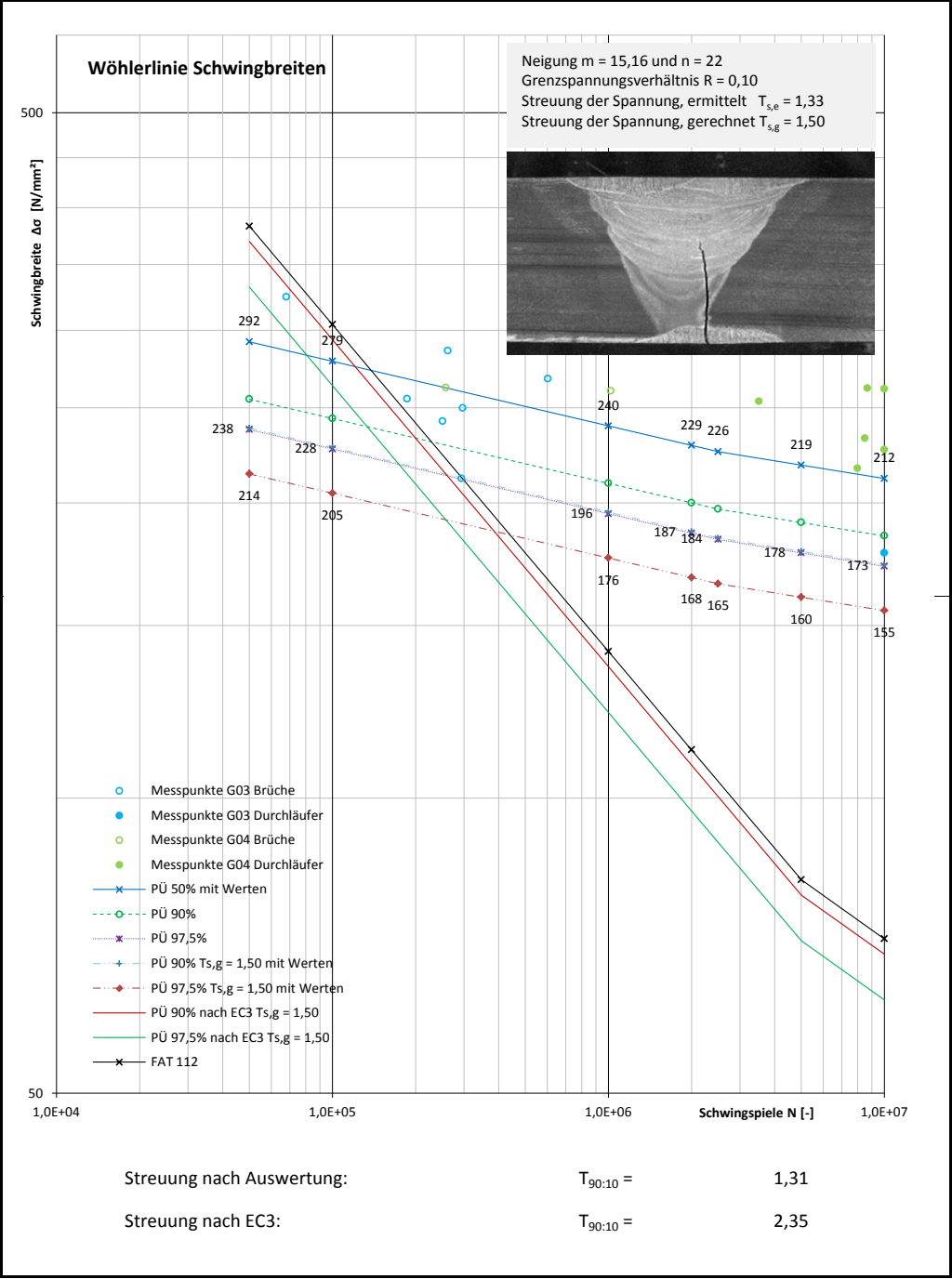
## A.19 Zusammenfassung Proben FAT 112

<b>Probe Nr.:</b>	<b>Übersicht über alle gleichartigen Proben</b>
<b>Herkunft:</b>	<b>Vollnaht eingeebnet / FAT 112</b>

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis R = 0,10			
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 112		Neigung der Wöhlerlinie m = 15,16			
			Abknickpunkt bei N <sub>B</sub> = 2,50E+06			
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{\text{oben}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{\text{mitte}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{\text{unten}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{\text{ampl.}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
28	283,7	156,0	28,4	127,7	255,3	186.569
29	269,2	148,1	26,9	121,1	242,3	250.924
30	235,2	129,4	23,5	105,8	211,7	293.625
31	277,6	152,7	27,8	124,9	249,8	296.895
32	197,5	108,6	19,8	88,9	177,8	10.000.000
33	291,1	160,1	29,1	131,0	262,0	257.907
34	241,0	132,6	24,1	108,5	216,9	7.987.418
35	258,6	142,2	25,9	116,4	232,7	8.506.475
36	282,0	155,1	28,2	126,9	253,8	3.512.048
37	288,9	158,9	28,9	130,0	260,0	1.020.784
38	290,9	160,0	29,1	130,9	261,8	8.676.849
39	290,3	159,7	29,0	130,6	261,3	10.000.000
40	251,7	138,4	25,2	113,3	226,5	10.000.000
<p>Schwingbreite bei 2 Mio. Schwingspielen mit 97,5% Überlebenswahrscheinlichkeit und 1,50-facher Spannungsstreuung <math>\Delta\sigma</math> [N/mm<sup>2</sup>] = 167,9</p>						
<p>Proben 1-8 G01 Proben 25-32 G03</p> <p>Proben 9-16 G02 Gurt Proben 33-40 G04</p> <p>Proben 17-24 G02 Steg</p>						

Probe Nr.:	Übersicht über alle gleichartigen Proben
Herkunft:	Vollnaht eingeebnet / FAT 112

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche	Grenzspannungsverhältnis	R =	0,10
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 112	Neigung der Wöhlerlinie	m =	15,16
		Abknickpunkt bei	N <sub>B</sub> =	2,50E+06



## **A.20 Zusammenfassung Proben FAT 90**

Probe Nr.:	Übersicht über alle gleichartigen Proben
Herkunft:	Vollnaht / FAT 90

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis R = 0,10			
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 90		Neigung der Wöhlerlinie m = 6,00			
			Abknickpunkt bei N <sub>B</sub> = 2,50E+06			
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{oben}$ [N/mm²]	Mittel- spannung $\sigma_{mitte}$ [N/mm²]	Unter- spannung $\sigma_{unten}$ [N/mm²]	Spannungs- amplitude $\sigma_{ampl.}$ [N/mm²]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm²]	Schwingspiele N [-]
1	304,2	167,3	30,4	136,9	273,8	258.004
2	242,2	133,2	24,2	109,0	218,0	1.026.351
3	211,9	116,5	21,2	95,4	190,7	2.416.748
4	271,1	149,1	27,1	122,0	244,0	268.009
5	200,8	110,4	20,1	90,4	180,7	2.275.030
6	261,7	143,9	26,2	117,8	235,5	220.046
7	193,0	106,2	19,3	86,9	173,7	10.000.000
8	253,1	139,2	25,3	113,9	227,8	406.360
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
25	317,5	174,6	31,8	142,9	285,8	262.284
26	297,4	163,6	29,7	133,8	267,7	604.050
27	360,3	198,2	36,0	162,1	324,3	68.141

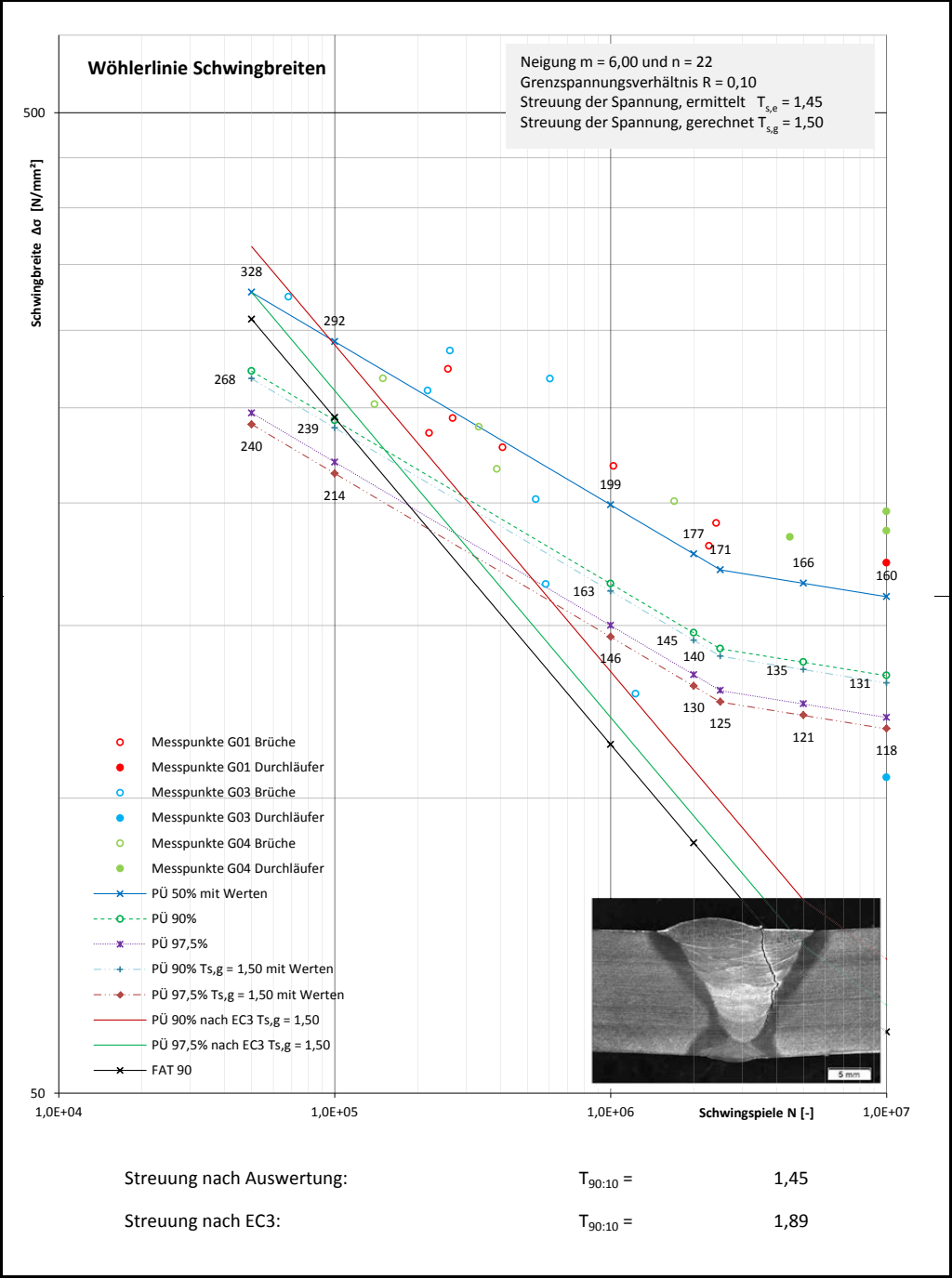
## A.20 Zusammenfassung Proben FAT 90

<b>Probe Nr.:</b>	<b>Übersicht über alle gleichartigen Proben</b>
<b>Herkunft:</b>	<b>Vollnaht / FAT 90</b>

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis R = 0,10			
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 90		Neigung der Wöhlerlinie m = 6,00			
			Abknickpunkt bei N <sub>B</sub> = 2,50E+06			
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{\text{oben}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{\text{mitte}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{\text{unten}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{\text{ampl.}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
28	116,6	64,1	11,7	52,5	104,9	10.000.000
29	141,9	78,0	14,2	63,9	127,7	1.232.344
30	224,0	123,2	22,4	100,8	201,6	536.167
31	289,2	159,1	28,9	130,1	260,3	217.575
32	183,6	101,0	18,4	82,6	165,2	583.293
33	297,5	163,6	29,8	133,9	267,8	149.943
34	280,1	154,1	28,0	126,0	252,1	139.605
35	265,6	146,1	26,6	119,5	239,0	333.308
36	240,6	132,3	24,1	108,3	216,5	387.230
37	205,1	112,8	20,5	92,3	184,6	4.469.959
38	208,0	114,4	20,8	93,6	187,2	10.000.000
39	217,7	119,7	21,8	98,0	195,9	10.000.000
40	223,0	122,7	22,3	100,4	200,7	1.701.467
<p>Schwingbreite bei 2 Mio. Schwingspielen mit 97,5% Überlebenswahrscheinlichkeit und 1,50-facher Spannungsstreuung <math>\Delta\sigma</math> [N/mm<sup>2</sup>] = 130,1</p>						
<p>Proben 1-8                      G01                      Proben 25-32                      G03</p> <p>Proben 9-16                    G02 Gurt                      Proben 33-40                    G04</p> <p>Proben 17-24                   G02 Steg</p>						

Probe Nr.:	Übersicht über alle gleichartigen Proben
Herkunft:	Vollnaht / FAT 90

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche	Grenzspannungsverhältnis	R =	0,10
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 90	Neigung der Wöhlerlinie	m =	6,00
		Abknickpunkt bei	N <sub>B</sub> =	2,50E+06





## **A.21 Zusammenfassung Proben FAT 71**

[illegible]

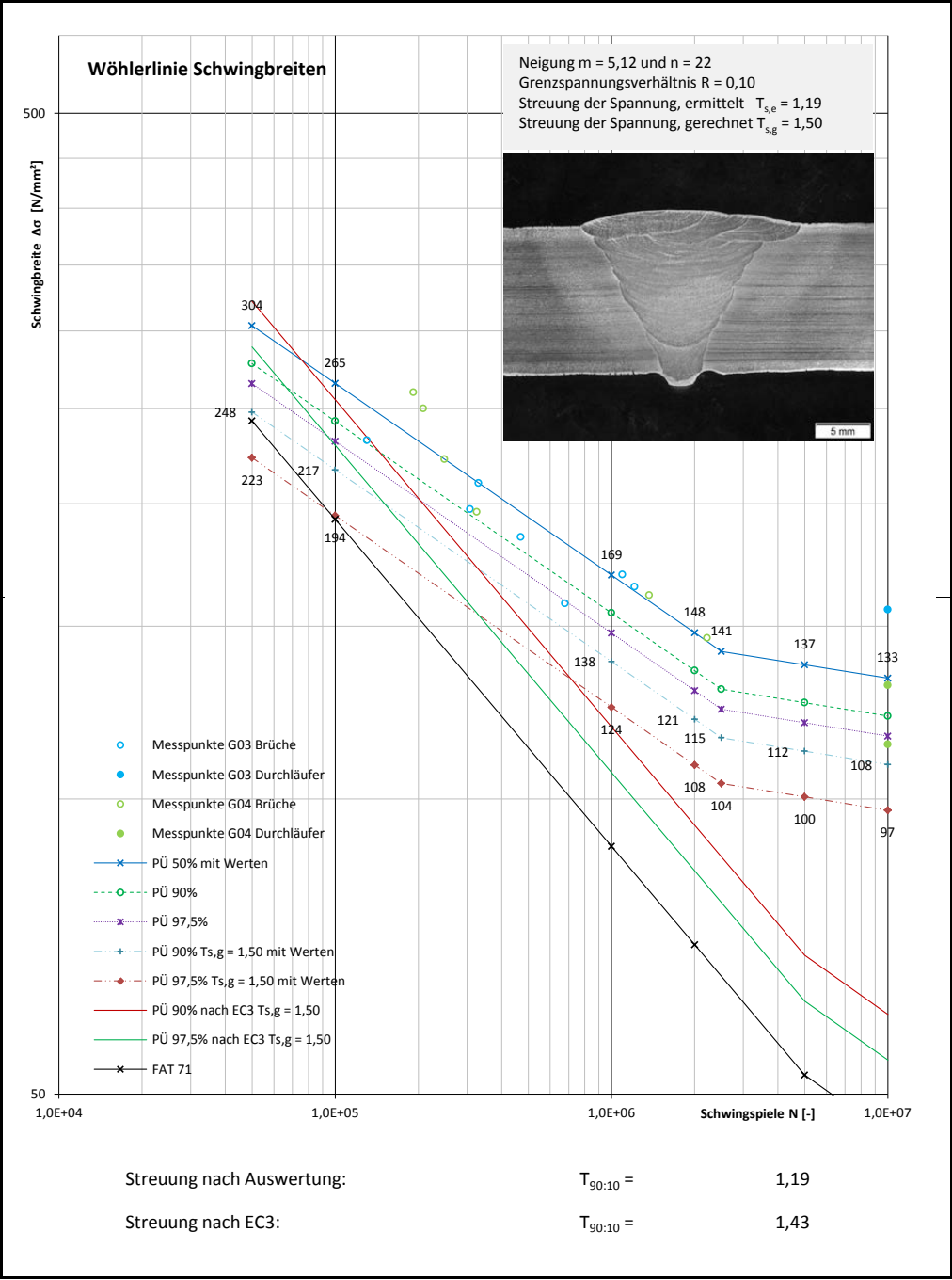
## A.21 Zusammenfassung Proben FAT 71

Probe Nr.:	Übersicht über alle gleichartigen Proben
Herkunft:	Vollnaht / FAT 71

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche		Grenzspannungsverhältnis R = 0,10			
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 71		Neigung der Wöhlerlinie m = 5,12			
			Abknickpunkt bei N <sub>B</sub> = 2,50E+06			
Bez.	Ober- spannung $\sigma_{\text{oben}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittel- spannung $\sigma_{\text{mitte}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Unter- spannung $\sigma_{\text{unten}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungs- amplitude $\sigma_{\text{ampl.}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele N [-]
28	233,2	128,3	23,3	104,9	209,9	330.230
29	219,3	120,6	21,9	98,7	197,4	307.789
30	182,8	100,5	18,3	82,3	164,5	1.211.695
31	188,1	103,5	18,8	84,6	169,3	1.095.918
32	173,3	95,3	17,3	78,0	156,0	10.000.000
33	288,6	158,7	28,9	129,9	259,7	191.780
34	277,8	152,8	27,8	125,0	250,0	208.424
35	246,6	135,6	24,7	111,0	221,9	248.647
36	218,0	119,9	21,8	98,1	196,2	325.459
37	179,2	98,6	17,9	80,6	161,3	1.369.941
38	162,1	89,2	16,2	72,9	145,9	2.217.796
39	126,3	69,5	12,6	56,8	113,7	10.000.000
40	145,1	79,8	14,5	65,3	130,6	10.000.000
<p>Schwingbreite bei 2 Mio. Schwingspielen mit 97,5% Überlebenswahrscheinlichkeit und 1,50-facher Spannungsstreuung <math>\Delta\sigma</math> [N/mm<sup>2</sup>] = 108,3</p>						
<p>Proben 1-8                      G01                      Proben 25-32                      G03</p> <p>Proben 9-16                    G02 Gurt                      Proben 33-40                    G04</p> <p>Proben 17-24                   G02 Steg</p>						

Probe Nr.:	Übersicht über alle gleichartigen Proben
Herkunft:	Vollnaht / FAT 71

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche	Grenzspannungsverhältnis	R =	0,10
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Vollnaht, FAT 71	Neigung der Wöhlerlinie	m =	5,12
		Abknickpunkt bei	N <sub>B</sub> =	2,50E+06



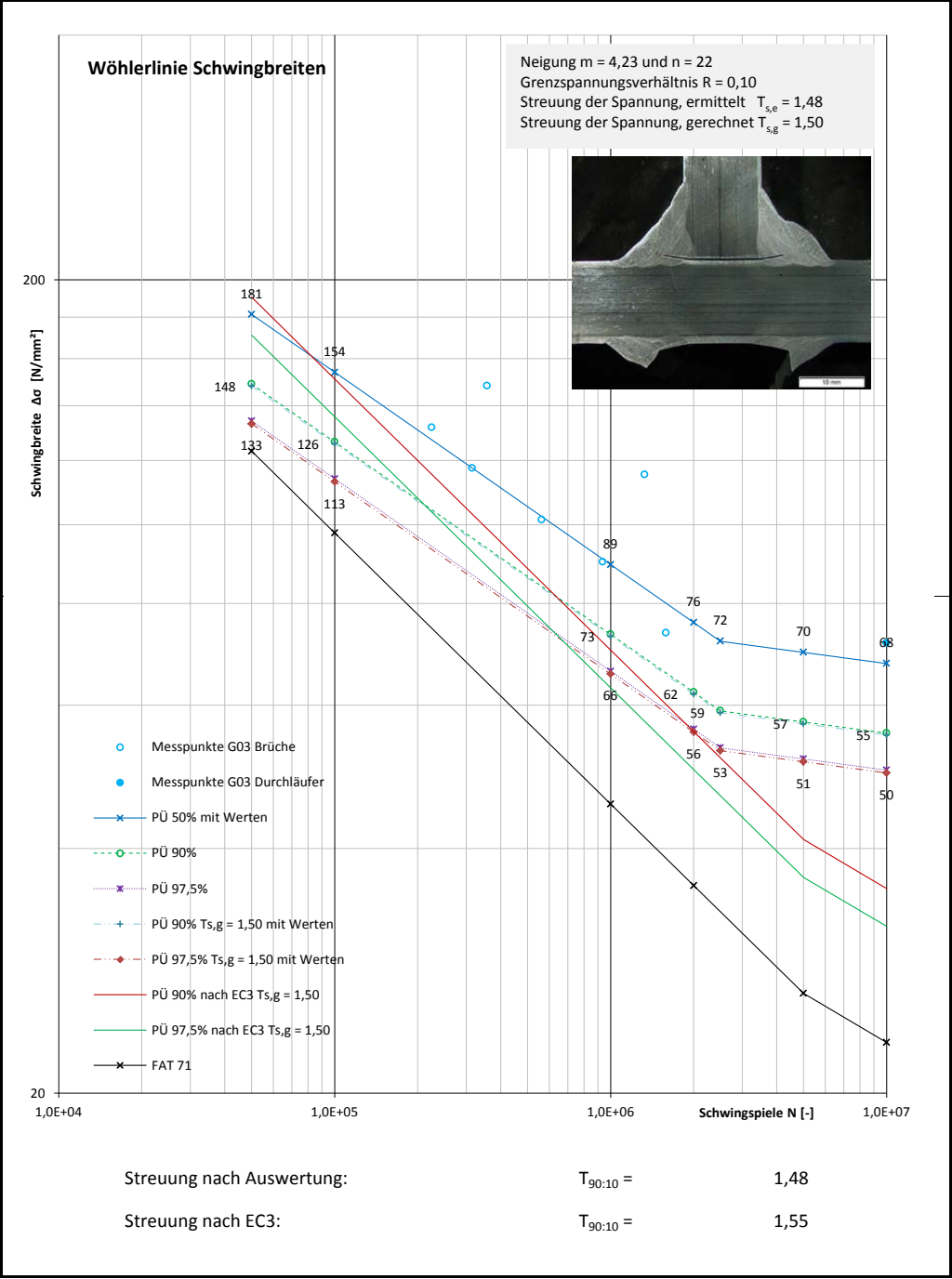
## **A.22 Zusammenfassung Proben FAT 36**

[illegible]



Probe Nr.:	Übersicht über alle gleichartigen Proben
Herkunft:	Kehlnähte als Kreuzstoß / FAT 36

Wöhler	Ergebnis der Schwingversuche	Grenzspannungsverhältnis	R =	0,10
	Grundmaterial, geschweißt, Rostnarben, Kehlnaht-Kreuzstoß, FAT 36	Neigung der Wöhlerlinie	m =	4,23
		Abknickpunkt bei	N <sub>B</sub> =	2,50E+06





**A.23 Gedächtnisprotokoll Nr. 1 zum Telefonat mit Prof. Kühn**

des Telefonats zwischen Prof. Dr.-Ing. Bertram Kühn und Stefan Doliva am Freitag, dem 09.01.2015, vormittags.

**Thema:            Mittelspannungsabhängigkeit von geschweißten Konstruktionen – Einordnung von Versuchsergebnissen**

Das Gespräch geht um die Einordnung von Versuchsergebnissen (Kleinproben) in die Systematik der DIN EN 1993-1-9, wobei insbesondere die Frage zu klären ist, ob hierzu Versuchsergebnisse von Kleinproben (Spannungsverhältnis  $R = 0,10$ ) auf ein Spannungsverhältnis von  $R = 0,50$  umzurechnen sind.

Diese Angabe taucht hin und wieder in der Literatur auf und wird unter anderem auch in den englischsprachigen Empfehlungen des IIW genannt.

Professor Kühn teilt mit, dass die an der RWTH Aachen vorgenommenen Auswertungen von Schwingversuchen nach folgendem Prozedere vorgenommen wurden:

Belastbare (dokumentierte) Schwingversuche für ein Kerbdetail wurden gesammelt.

Diese Versuche waren bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen durchgeführt worden.

Für alle diese Versuche wurde eine statistische Auswertung betrieben.

Für dieses Kerbdetail wurde eine FAT-Klasse angegeben.

Durch dieses Prozedere sind in dieser FAT-Klasse alle Spannungsverhältnisse  $R$  erfasst. Damit ist das Einordnen von (Klein-)Versuchen ohne Umrechnung auf  $R = 0,50$  abgedeckt (Mittelspannungsunabhängigkeit des EC 3).

Professor Kühn weist darauf hin, dass möglicherweise eine Mittelspannungsabhängigkeit vorhanden ist bzw. für bestimmte Kerbdetails auch nachgewiesen wurde. Einem Ansatz dieser Abhängigkeit im Berechnungsmodell steht jedoch die für in der Praxis arbeitende Ingenieure schwierige Problematik gegenüber, dass das tatsächlich am späteren Bauwerk im Bereich des betrachteten Details wirkende Niveau der Mittelspannung kaum berechenbar oder auch nur abschätzbar ist. Das Niveau der Mittelspannung setzt sich nämlich neben den lastabhängigen, rechnerisch beherrschbaren Komponenten, u. a. auch aus Einflüssen wie Walz- oder Schweißeigenspannungen zusammen, für deren zuverlässige Bestimmung keine praxisnahen Methoden zur Verfügung stehen.

Aufgestellt: Berlin, 13.03.2015, Doliva

**A.24 Gedächtnisprotokoll Nr. 2 zum Telefonat mit Prof. Kühn**

des Telefonats zwischen Prof. Dr.-Ing. Bertram Kühn und Stefan Doliva am zwischen dem 09.01.2015 und dem 25.01.2015 (genauer Termin nicht mehr bekannt).

**Thema: Übertragung von Versuchen an Altstählen auf das Vorgehen in DIN EN 1993-1-9**

Die erörterte Frage ist, ob sich Schwingversuche an Altstählen in die Systematik des EC 3-1-9 übertragen lassen, denn die Vorschriften des EC 3-1-9 sind an modernen Stählen (nach etwa 1970) gewonnen worden.

Aufgrund von veränderten Herstellungsverfahren kann es sein, dass für ältere Stähle dieses Vorgehen nicht zulässig ist.

Ein Beleg für die Zulässigkeit ist aber, wenn sich in alten Vorschriften Angaben zur Ermüdung des Materials (Stahl, Flusstahl) finden.

Professor Kühn verweist auf alte Vorschriften der Bahn, deren Namen er jedoch gerade nicht präsent hat, in denen sich entsprechende Hinweise finden könnten. „BG, BN, ... etwas in der Art.“

Aufgestellt: Berlin, 13.03.2015, Doliva

**Ergänzung des Protokollierenden:**





Die Bahn (Reichsbahn) hat in ihren Bemessungsvorschriften für Brückenbauwerke (Titel: BE Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken) zum Beispiel in der Ausgabe von 1934 Vorschriften für die Bemessung veröffentlicht. Dort sind in **§ 36 Berechnung der Spannungen ( $\gamma$ -Verfahren)** Angaben zur Berechnung unter wechselnder oder schwelender Beanspruchung gemacht worden.

Diese Vorschrift kann unter [www.hivobau.de](http://www.hivobau.de) eingesehen werden. Dort sind auch frühere Vorschriften für Brückenbauwerke (Eisenbahn und Straße) einsehbar.

Aus meiner Sicht ist damit gewährleistet, dass die Ergebnisse, die aus Altstählen gewonnen werden, in die Systematik des EC 3-1-9 übertragbar.

Aufgestellt: Berlin, 13.03.2015, Doliva

## **A.25 Prüfmaschinen**

Beschreibung	Bild der Prüfmaschine
Mikroskopie: Auflichtmikroskop Olympus GX 71, Olympus Deutschland GmbH, Foto: SLV Halle GmbH	 A photograph of an Olympus GX 71 light microscope on a desk. The microscope is white and black, with a large eyepiece and a camera attached. A computer monitor to the right shows a software interface with a microscopic image.
Mikroskopie: Stereomikroskop Olympus SZ 61, Olympus Deutschland GmbH, Foto: SLV Halle GmbH	 A photograph of an Olympus SZ 61 stereomicroscope on a desk. The microscope is white and black, with two eyepieces and a camera. A computer monitor to the left shows a software interface with a microscopic image.
Elektronenmikroskopie: Rasterelektronenmikroskop TM 3000, Hitachi Deutschland GmbH, Foto: SLV Halle GmbH	 A photograph of a Hitachi TM 3000 scanning electron microscope (SEM) on a desk. The SEM is a tall, blue and silver unit. A computer monitor to the left shows a software interface with a microscopic image.
Spektrometrie: Spektrometer SpectroMaxx, SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Foto: SLV Halle GmbH	 A photograph of a SpectroMaxx spectrometer on a desk. The spectrometer is a blue and white unit with a sample holder on top. A computer monitor to the left shows a software interface with a spectral graph.

**Tabelle A.1:** Prüfmaschinen Teil 1. Mikroskopie und Spektrometrie

---

**Beschreibung**

**Bild der Prüfmaschine**

---

Kerbschlagbiegeversuch: WPM  
Pendelschlagwerk PS 30, Werk-  
stoffprüfmaschinen-Leipzig  
GmbH, Foto: SLV Halle GmbH



Zugversuch: Spindelzug-  
maschine UTS 100k mit Steue-  
rung Zwick/Roell, Foto: SLV  
Halle GmbH



---

**Tabelle A.2:** Prüfmaschinen Teil 2. Kerbschlag- und Zugversuche

Beschreibung	Bild der Prüfmaschine
<p>Zugversuch: WPM Spindelzugmaschine ZD 100 PU, Foto: SLV Halle GmbH</p>	 <p>A photograph of a green and blue WPM Spindelzugmaschine ZD 100 PU, a vertical screw-driven tensile testing machine, in a laboratory setting with windows in the background.</p>
<p>Dauerschwingversuch: Prüfmaschine MTS 250 kN, servo-hydraulisch, Prüffrequenz von 16 Hz, gewählte Abschaltung bei 0,5 mm Dehnweg (technischer Anriss) Foto: SLV Halle GmbH</p>	 <p>A photograph of an MTS 250 kN servo-hydraulic testing machine, showing a vertical frame with a central testing head and various hydraulic lines.</p>
<p>Dauerschwingversuch: Zwick/Roell, Amsler 150 HFP 5100, Hochfrequenzpulser, automatische Abschaltung bei Änderung der Probeneigenfrequenz von 5 Hz, Foto: SLV Halle GmbH</p>	 <p>A photograph of a Zwick/Roell Amsler 150 HFP 5100 testing machine, a large industrial unit with a control panel and a gas cylinder nearby.</p>

**Tabelle A.3:** Prüfmaschinen Teil 3. Zug- und Dauerschwingversuche



## **A.26 Probenentnahme Grundwerkstoff G01**

---

**Beschreibung**

---

Ausgebaute Schleusenketten Wehr L des Mains, Randersacker, Nähe Schweinfurt [78]

---



---

**Tabelle A.4:** Grundwerkstoff G01 – Schleusenkette

---

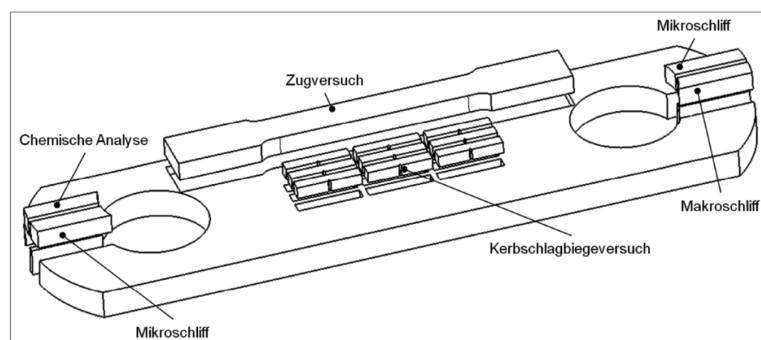
---

### Beschreibung

---

Probenentnahme für Zugversuch, Kerbschlagbiegeversuch, metallografische Untersuchung und chemische Analyse [78]

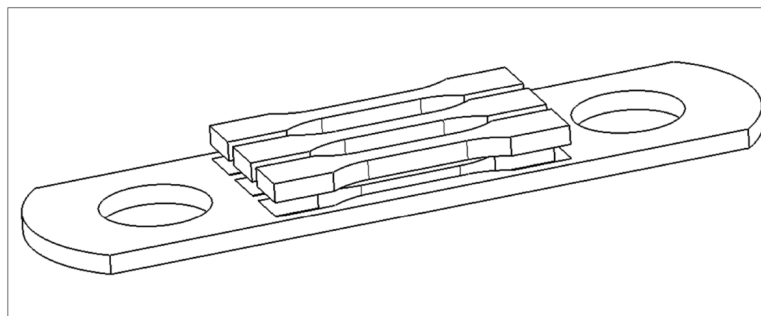
---



---

Probenentnahme für Dauerschwingversuche am Grundwerkstoff, insgesamt neun Proben [78]

---



---

**Tabelle A.5:** Grundwerkstoff G01 – Probenentnahme

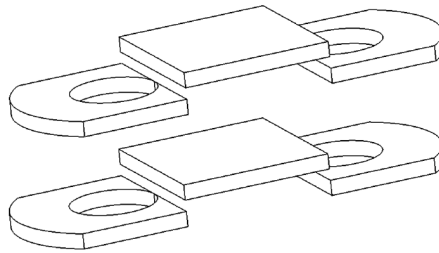
---

**Beschreibung**

---

Probenentnahme für Dauerschwingversuche am geschweißten Grundwerkstoff, insgesamt neun Proben, hier Mittelstückentnahme aus sechs kurzen Schleusenket tengliedern [78]

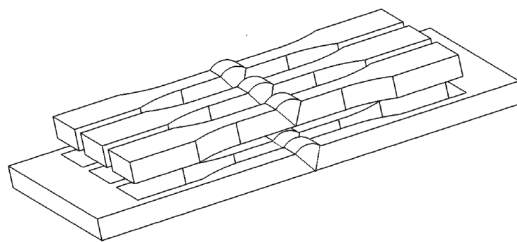
---



---

Probenentnahme für Dauerschwingversuche am geschweißten Grundwerkstoff, Entnahme von jeweils drei Proben aus einem Schweißstück, sodass insgesamt neun Proben entstehen [78]

---



---

Lichtbogenhandschweißen unter Vorspannung von jeweils zwei Mittelstücken quer zur Walzrichtung, sodass drei Schweißstücke entstehen.

---

**Tabelle A.6:** Grundwerkstoff G01 – Probenentnahme

## **A.27 Probenentnahme Grundwerkstoff G02**

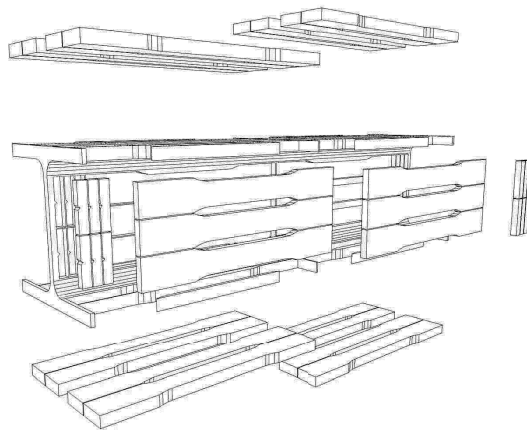
---

**Beschreibung**

---

Verbandsstab einer Untertageanlage

---



---

**Tabelle A.7:** Grundwerkstoff G02 – Verbandsstab

## Beschreibung

Probenentnahme für Zugversuch, Kerbschlagbiegeversuch, metallografische Untersuchung, chemische Analyse und Dauerschwingversuche mit und ohne Auftragsschweißung

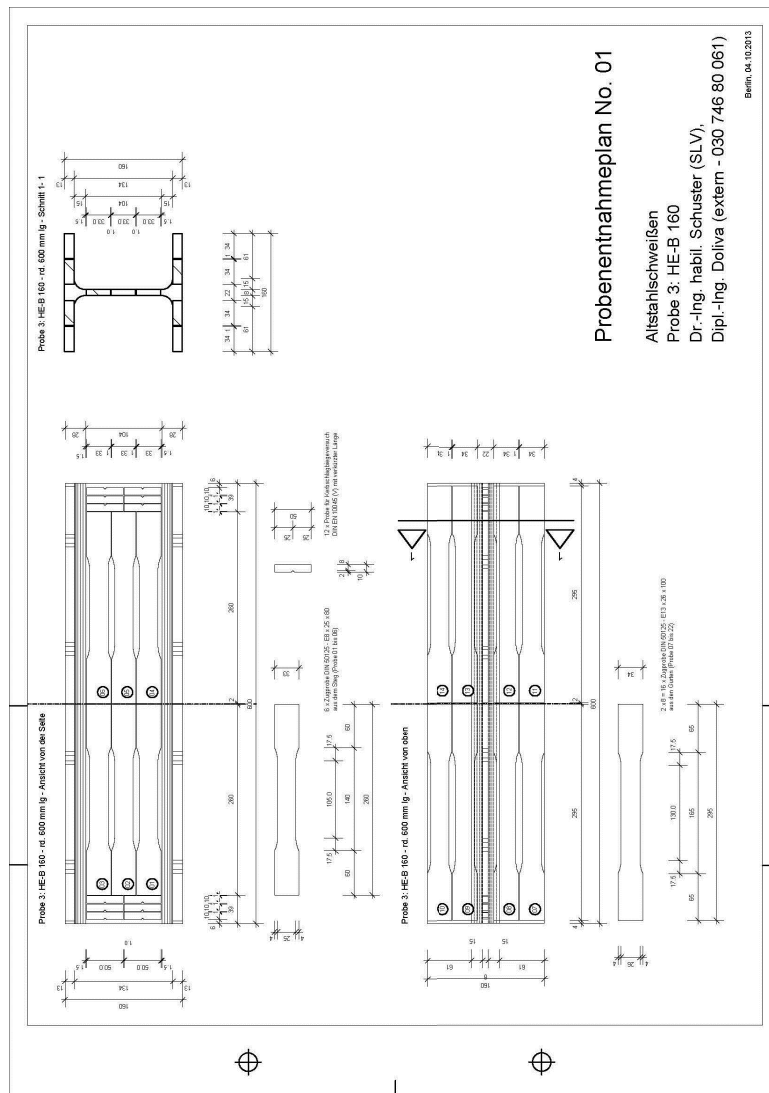


Tabelle A.8: Grundwerkstoff G02 – Probenentnahme

## **A.28 Probenentnahme Grundwerkstoff G03**



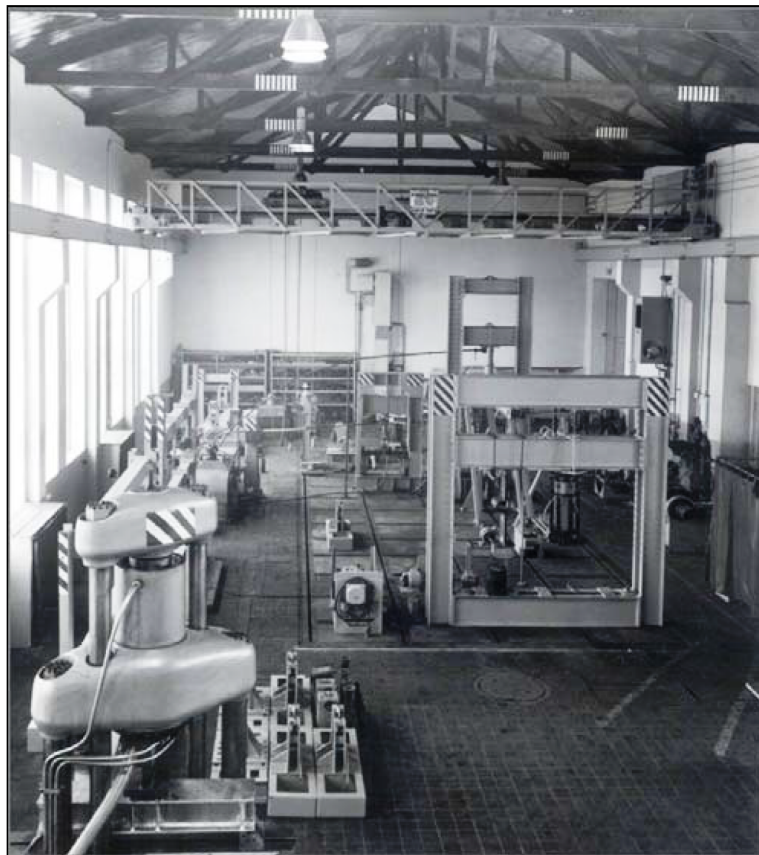
---

### Beschreibung

---

Stahlkonstruktion des Brückenkrans in der Schwinghalle der SLV Halle, Foto: SLV Halle, undatiert, etwa 1950, entnommen aus [119]

---



---

„Beim verwendeten Stahlbauträger handelte es sich um einen 12 m langen I-Träger „I 500 x 140 x 155 x 15 x 15“ in Schweißbauweise, d. h., der Träger wurde aus mehreren Halbzeugen (Blechen und Flachstählen) zusammengeschweißt“ [119]. Der Träger wurde wegen eines Risses am abgesetzten Auflager außer Betrieb genommen.

---

**Tabelle A.9:** Grundwerkstoff G03 – Stahlkonstruktion des Brückenkrans 1950

---

**Beschreibung**

---

Stahlkonstruktion des Brückenkrans der Schwinghalle in heutigem Zustand, Foto: SLV Halle, entnommen aus [119]

---



---

Die Auswahl der Proben erfolgte ohne zeichnerische Planung, alle Proben wurden in Walzrichtung genommen

---

**Tabelle A.10:** Grundwerkstoff G03 – Stahlkonstruktion des Brückenkrans heute

## **A.29 Probenentnahme Grundwerkstoff G04**

---

### Beschreibung

---

Winkelstütze, genietet, aus dem U-Bahnhof Warschauer Straße in Berlin (U-Bahn-Linie U1), Foto: Metallbau Swen Adamczyk

---



---

Die Auswahl der Proben erfolgte ohne zeichnerische Planung, alle Proben wurden in Walzrichtung genommen. Die Bindebleche wurden nicht verwendet.

---

**Tabelle A.11:** Grundwerkstoff G04 – Winkelstütze U-Bahnhof Warschauer Straße, Berlin



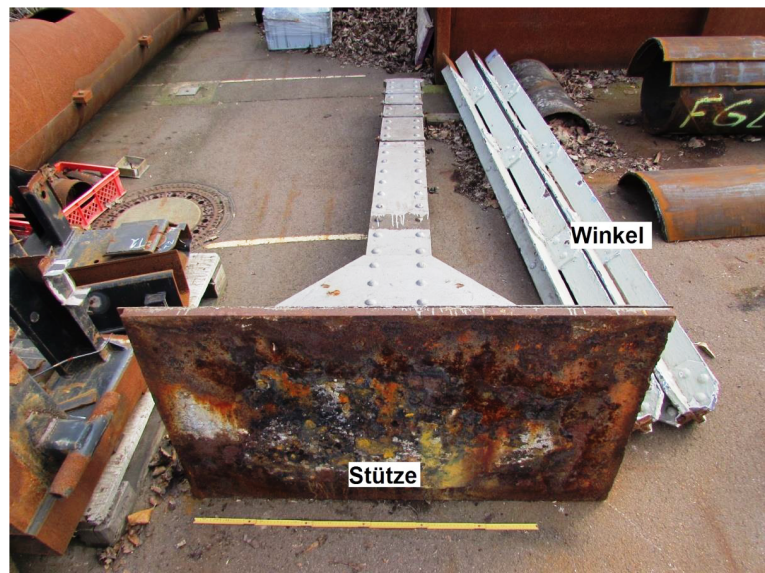
---

### Beschreibung

---

Winkelstütze, genietet, aus dem U-Bahnhof Warschauer Straße in Berlin (U-Bahn-Linie U1), Fotos: Metallbau Swen Adamczyk

---

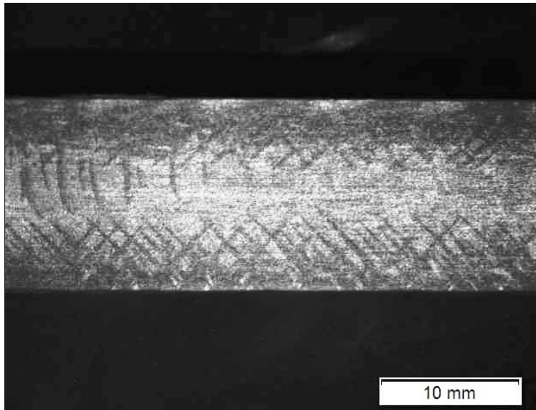


---

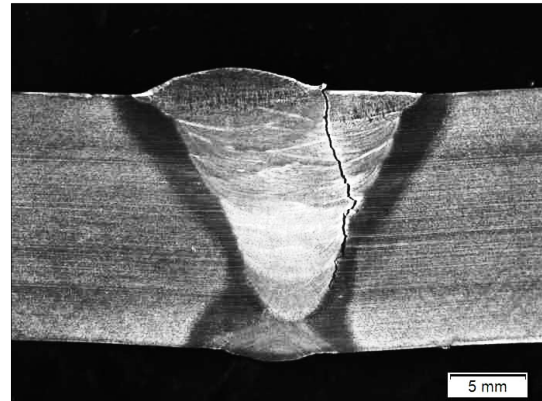
**Tabelle A.12:** Grundwerkstoff G04 – Fußpunkt der Winkelstütze im Bahnhof und ausgebaute Stütze

---

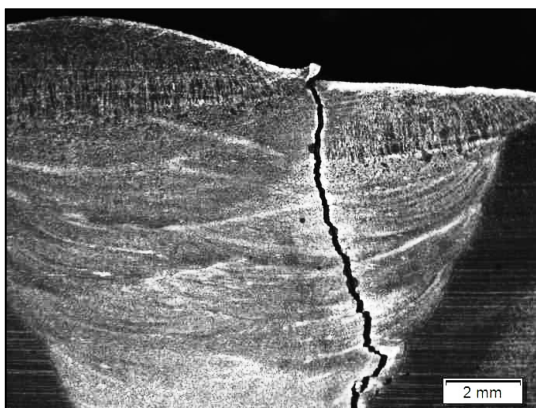
## **A.30 Bilder und Schliffe**



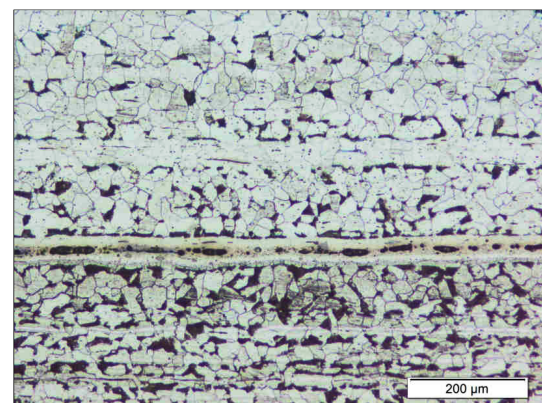
**Abbildung A.1:** Probe G01-01, Grundwerkstoff FAT 160, Kraftwirkungslinien nach Fry, keine Speckschicht [78]



**Abbildung A.2:** Probe G01-02, Schweißnaht FAT 90, Riss in der Schweißnaht, Übersicht [78]

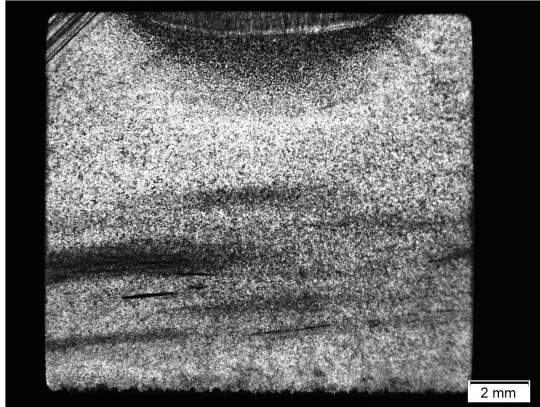


**Abbildung A.3:** Probe G01-02, Schweißnaht FAT 90, Riss in der Schweißnaht, Detail Rissbeginn und Kerbe [78]

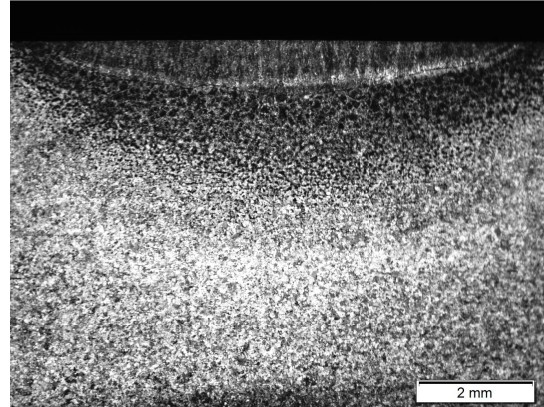


**Abbildung A.4:** Probe G01-02, Schweißnaht FAT 90, Mikrogefüge Altstahl, ausgeprägte Ferritzeilen und nichtmetallische Einschlüsse [78]

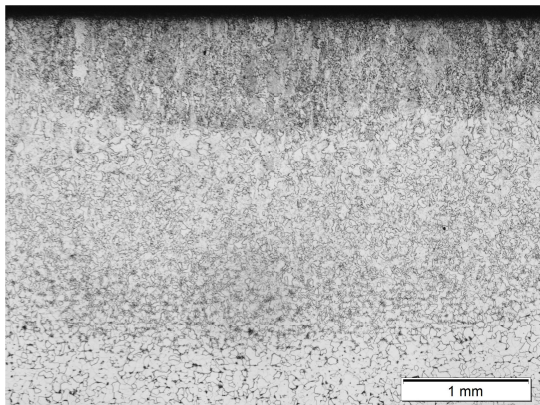




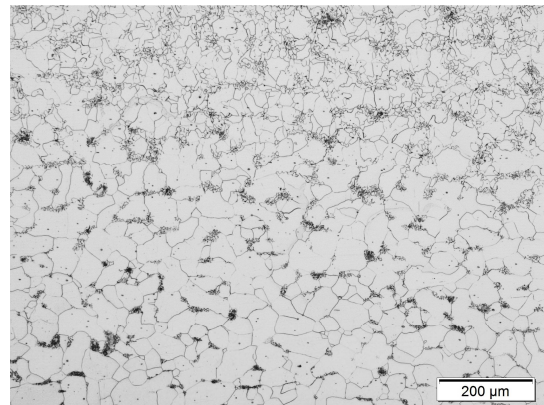
**Abbildung A.5:** Probe G02-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Übersicht



**Abbildung A.6:** Probe G02-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, oberer Teil

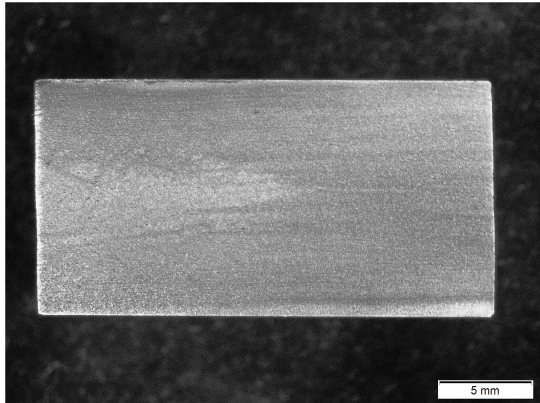


**Abbildung A.7:** Probe G02-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Vergrößerung der WEZ

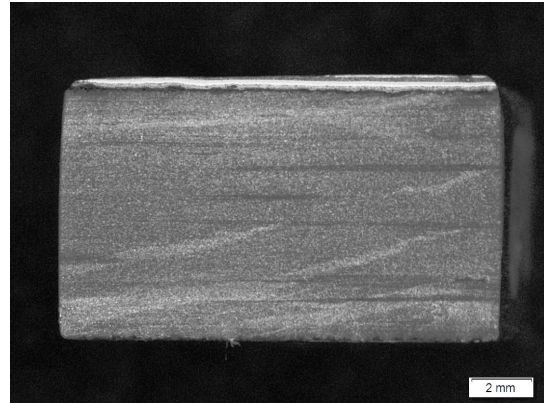


**Abbildung A.8:** Probe G02-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Gefüge der WEZ feinkörnig

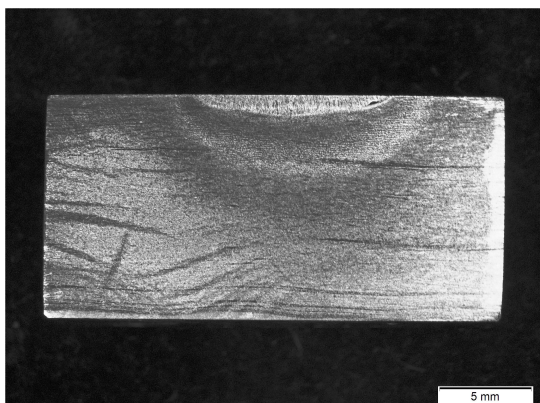




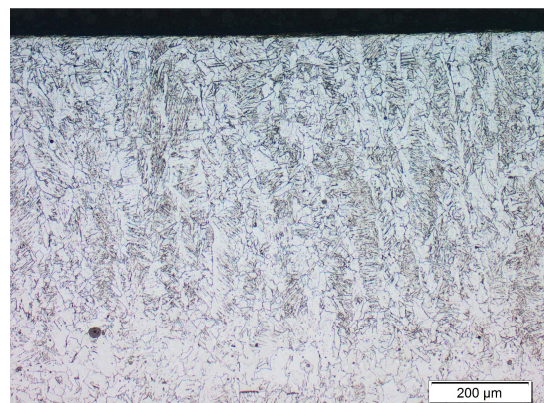
**Abbildung A.9:** Probe G03-01,  
Grundwerkstoff FAT 160, keine  
Speckschicht



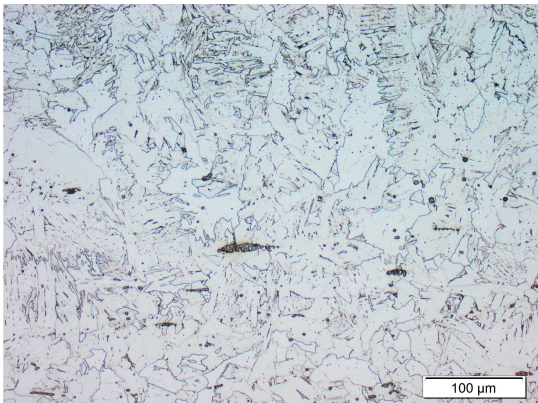
**Abbildung A.10:** Probe G03-01,  
Grundwerkstoff FAT 160, keine  
Speckschicht, Vergrößerung



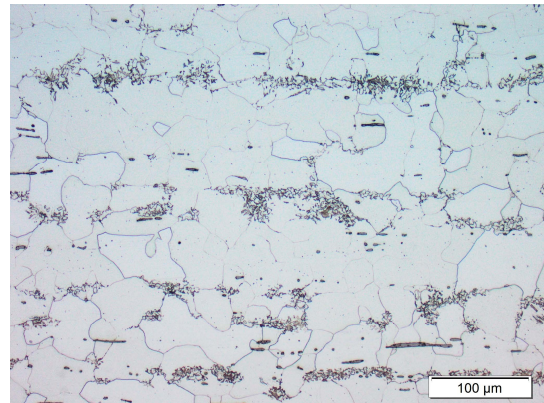
**Abbildung A.11:** Probe G03-02,  
Grundwerkstoff FAT 160 mit abge-  
schliffener Auftragsraupe



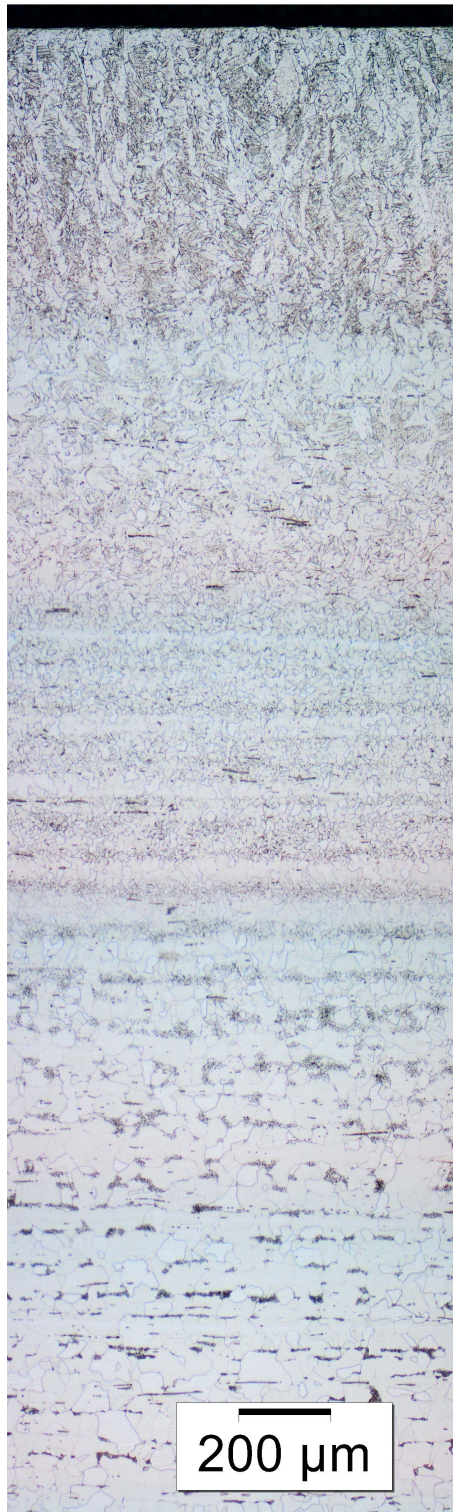
**Abbildung A.12:** Probe G03-02,  
Grundwerkstoff FAT 160 mit abge-  
schliffener Auftragsraupe, Gefüge im  
Schweißgut



**Abbildung A.13:** Probe G03-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Gefüge in der WEZ

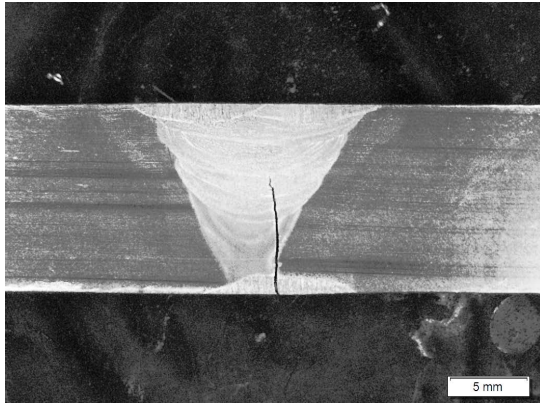


**Abbildung A.14:** Probe G03-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Gefüge im Grundwerkstoff

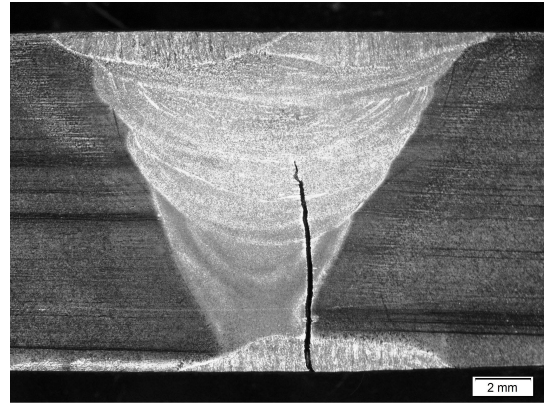


**Abbildung A.15:** Probe G03-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe, Schliff über die Höhe

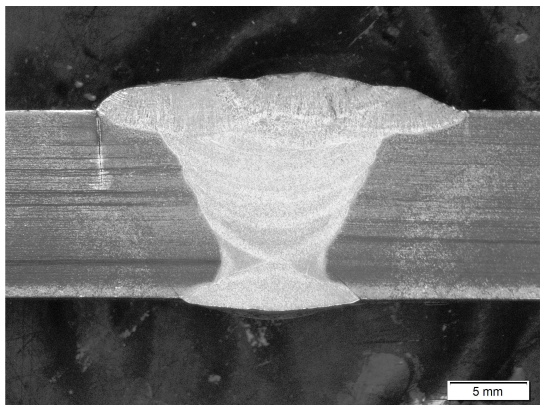




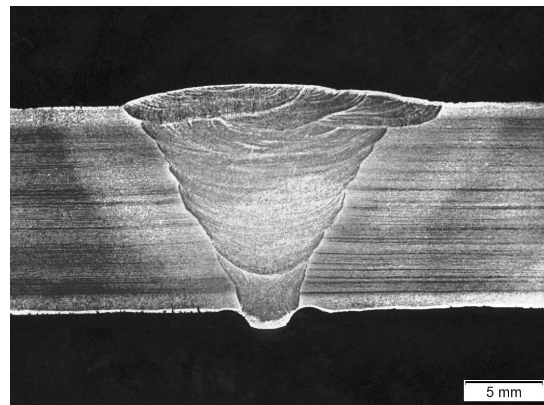
**Abbildung A.16:** Probe G03-03, Schweißnaht FAT 112, Riss in der Schweißnaht, Beginn an einem Schlackeeinschluss



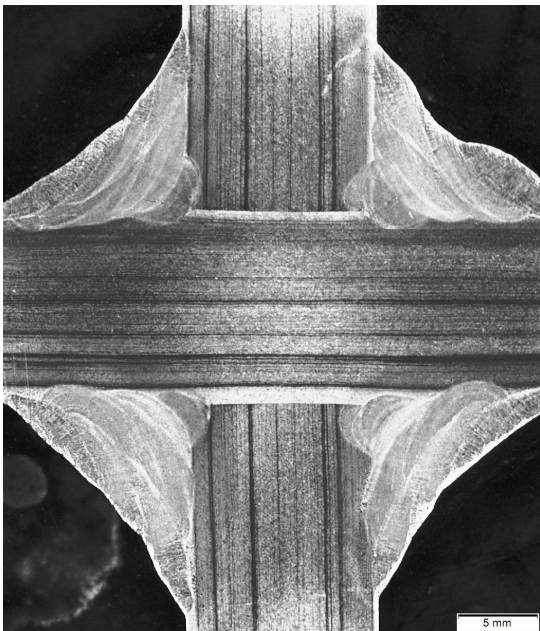
**Abbildung A.17:** Probe G03-03, Schweißnaht FAT 112, Riss in der Schweißnaht, Vergrößerung



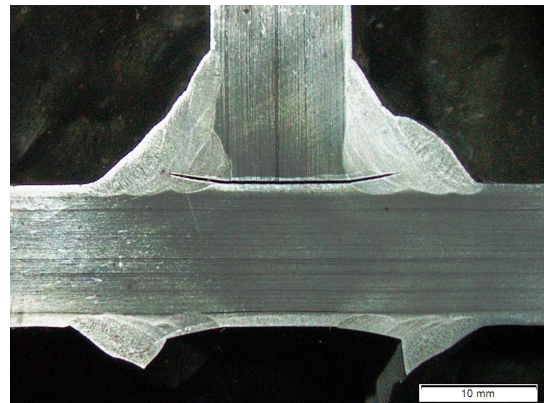
**Abbildung A.18:** Probe G03-04, Schweißnaht FAT 90, Riss an der Schweißnaht, Nahtanstiegswinkel zu groß



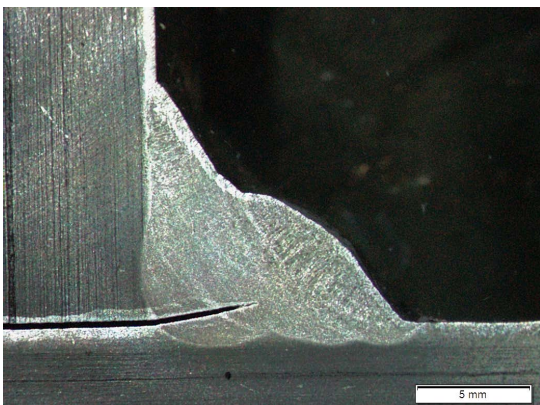
**Abbildung A.19:** Probe G03-05, Schweißnaht FAT 71, einseitig geschweißt, Durchläufer



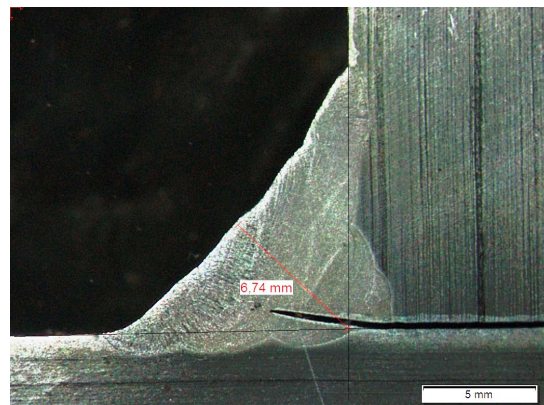
**Abbildung A.20:** Probe G03-06, Schweißnaht FAT 36, Kreuzstoß mit Riss am Nahtansatz, niedriges Lastniveau



**Abbildung A.21:** Probe G03-06, Schweißnaht FAT 36, Kreuzstoß mit Riss an der Nahtwurzel, hohes Lastniveau

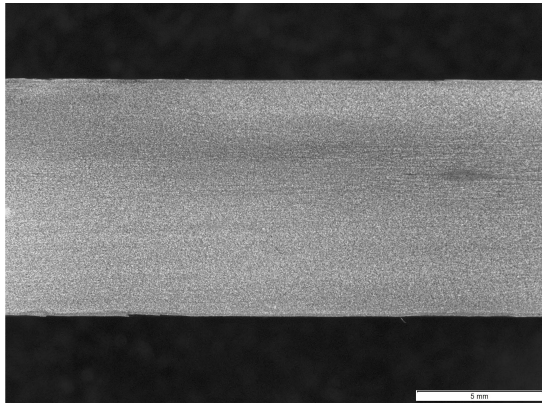


**Abbildung A.22:** Probe G03-06, Schweißnaht FAT 36, Kreuzstoß mit Riss an der Nahtwurzel

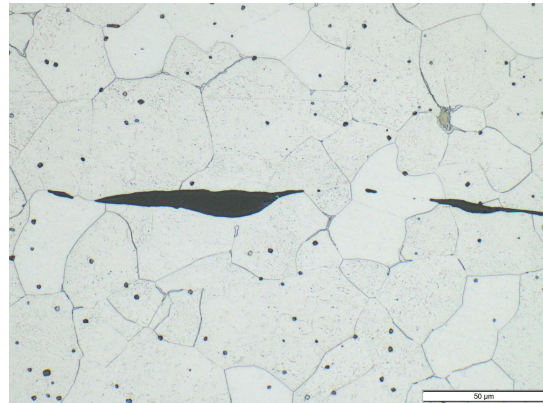


**Abbildung A.23:** Probe G03-06, Schweißnaht FAT 36, Kreuzstoß mit Riss an der Nahtwurzel, Nahtdicke rund 7 mm

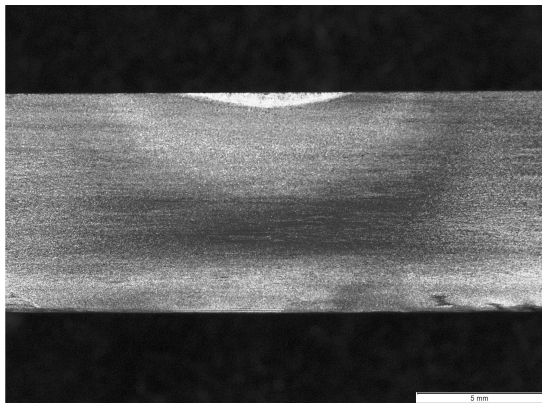




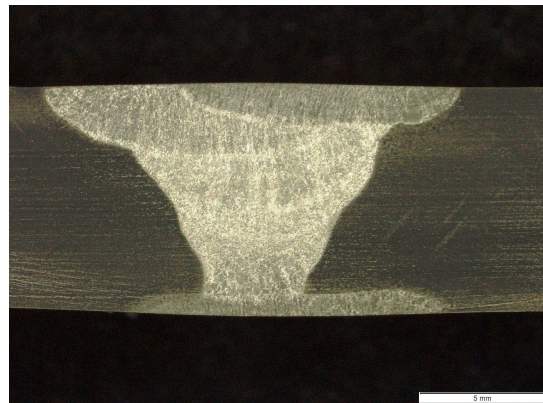
**Abbildung A.24:** Probe G04-01, Grundwerkstoff FAT 160, keine Speckschicht



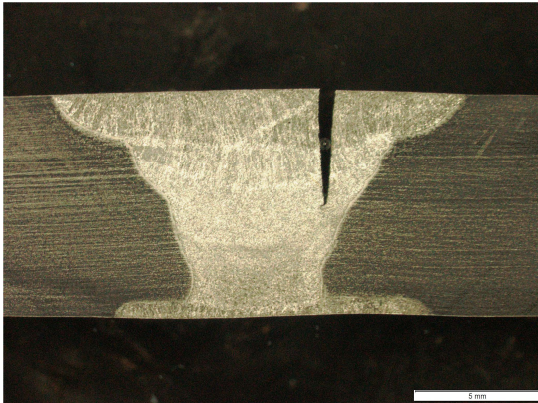
**Abbildung A.25:** Probe G04-01, Grundwerkstoff FAT 160 mit nicht-metallischen Einschlüssen



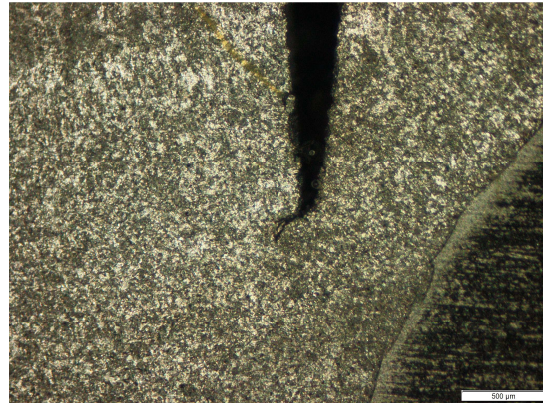
**Abbildung A.26:** Probe G04-02, Grundwerkstoff FAT 160 mit abgeschliffener Auftragsraupe



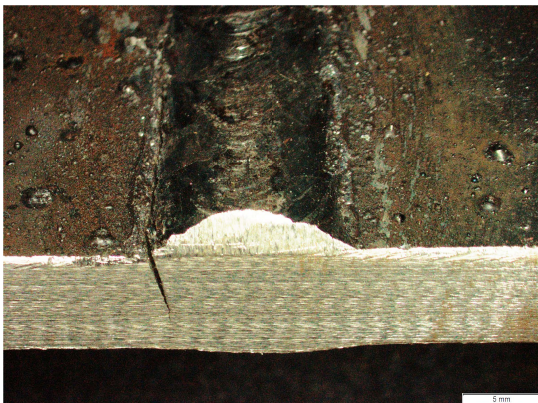
**Abbildung A.27:** Probe G04-03, Schweißnaht FAT 112, Durchläufer



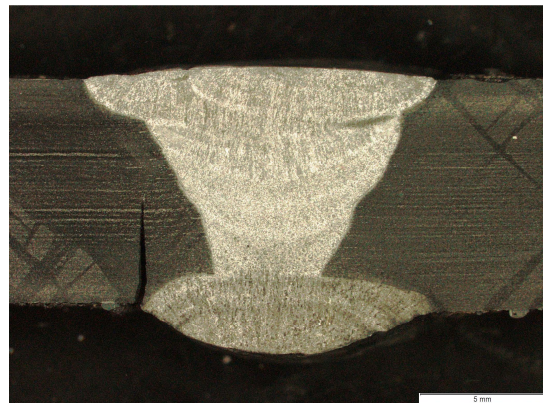
**Abbildung A.28:** Probe G04-03, Schweißnaht FAT 112, Riss in der Schweißnaht



**Abbildung A.29:** Probe G04-03, Schweißnaht FAT 112, Riss in der Schweißnaht, Vergrößerung des Risses



**Abbildung A.30:** Probe G04-04, Schweißnaht FAT 90, Riss neben der Schweißnaht

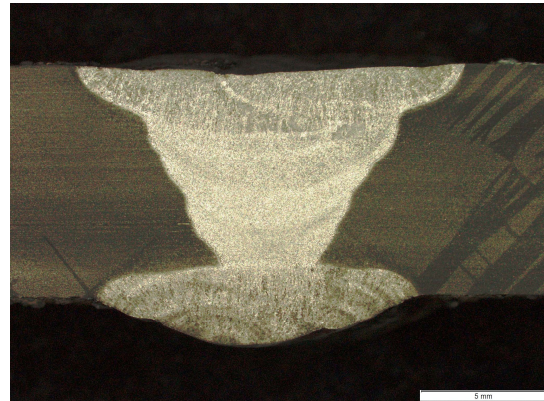


**Abbildung A.31:** Probe G04-04, Schweißnaht FAT 90, Riss neben der Schweißnaht, Nahtansatzwinkel





**Abbildung A.32:** Probe G04-04, Schweißnaht FAT 90, Dauerschwingprobe



**Abbildung A.33:** Probe G04-03, Schweißnaht FAT 90, Durchläufer

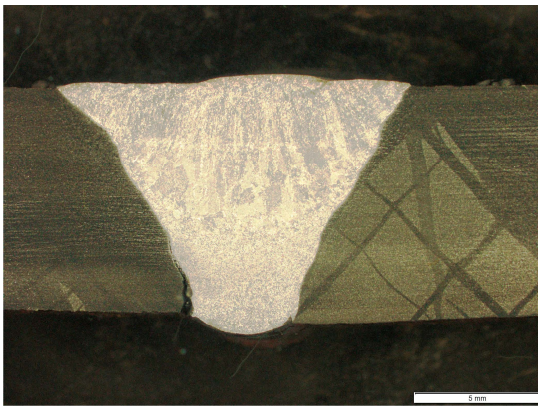


**Abbildung A.34:** Probe G04-05, Schweißnaht FAT 71, Durchläufer

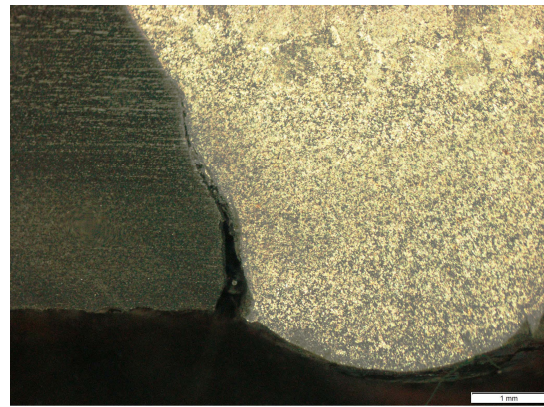


**Abbildung A.35:** Probe G04-05, Schweißnaht FAT 71, Vergrößerung





**Abbildung A.36:** Probe G04-05,  
Schweißnaht FAT 71, Riss an der  
Wurzel



**Abbildung A.37:** Probe G04-05,  
Schweißnaht FAT 71, Riss an der  
Wurzel, Vergrößerung des Risses